

Energieeffiziente Zielnetzplanung der Darmstädter Hochzonen

Fachbereich 13
Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Technische Universität Darmstadt

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science (M.Sc.)

von
Dominik Marx
Matrikel-Nr.: 2424121

Prüfer:
Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban

Betreuung durch:
Sonja Geiß, M.Sc.

und
Dipl.-Ing. Martin Grüger, M.Sc.
Dipl.-Ing. Christiane Wolle

ENTEGA AG
Frankfurter Straße 110
64293 Darmstadt

Darmstadt, 20. Januar 2016

Kurzfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der energetischen Betrachtung der Sanierungsmaßnahmen, die das Darmstädter Wasserversorgungsunternehmen *ENTEKA* zwischen den Jahren 2013 und 2017 vornimmt, um den Betrieb der Darmstädter Hochzonen zu optimieren. Dazu erfolgt ein Vergleich des Energiebedarfs zur Versorgung der Hochzonen zwischen dem alten (ALT-) und dem geplanten (SOLL-) Zustand. Zur Ermittlung des Energiebedarfs des ALT-Zustandes stehen Messwerte aus dem Jahr 2013 zur Verfügung. Der Energiebedarf des SOLL-Zustandes wird über Leistungsdaten der neuen Pumpenanlagen sowie hydraulische Simulationen mit dem Rohrnetzberechnungsprogramm STANET ermittelt. Die hier angewandte Methodik setzt ein Mess- und Regelsystem der Pumpenanlagen voraus, welches im Rahmen der Sanierungsmaßnahmen in dieser Art und Weise nicht geplant ist. Daher kann der Energiebedarf des SOLL-Zustandes lediglich als ein Potenzial begriffen werden, das durch eine zusätzliche Erweiterung des Mess- und Regelsystems ausgenutzt werden kann. Dabei wird ein Potenzial zur Verringerung des Energiebedarfs gegenüber dem des ALT-Zustandes von 38 - 51 % festgestellt.

Weiterhin befasst sich diese Arbeit mit der Ermittlung einer Pumpensteuerung, mit welcher der Energiebedarf zur Versorgung der Gebiete im SOLL-Zustand minimiert werden soll. Aus methodischen Gründen kann in dieser Arbeit keine eindeutig optimale Pumpensteuerung entwickelt werden. Deshalb wird auf Basis des von Hähnlein (2008) entwickelten Optimierungsmodells ein Ansatz entwickelt, mit dem eine optimale Pumpensteuerung nach Anlauf des Betriebs im SOLL-Zustand ermittelt werden kann.

Mit Hilfe einer Investitionsrechnung wird die These überprüft, dass sich die Energiekosten durch die Sanierung und Integration einer zusätzlichen Druckerhöhungsanlage in das Versorgungskonzept so weit absenken lassen, dass sich die Investitionskosten amortisieren. Die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme kann in dieser Arbeit jedoch nicht festgestellt werden. Allerdings wird festgehalten, dass das WVU seine Investitionsentscheidung vor allem unter dem Gesichtspunkt der Versorgungssicherheit treffen und weitere Untersuchungen diesbezüglich durchführen sollte.

Abschließend wird das Versorgungsgebiet auf weiteres energetisches Potenzial hin untersucht. Ansatzpunkt zur Optimierung ist der vorzeitige Austausch von Rohrleitungen des Rohrnetzes zur Reduktion strömungsbedingter Druckverluste. Mit Hilfe von hydraulischen Simulationen wird dieses Optimierungspotenzial unter wirtschaftlichen Aspekten eingehend betrachtet. Dabei wird festgestellt, dass das Rohrnetz diesbezüglich kein weiteres Optimierungspotenzial besitzt. Dennoch wird dem WVU die Empfehlung gegeben, die Suche nach weiterem Optimierungspotenzial zur Senkung der Energiekosten fortzusetzen. Weiteres Optimierungspotenzial könnte z.B. in der Begrenzung von Wasserverlusten und der Ausnutzung von Schwachlastpreisen liegen.

Danksagung

An dieser Stelle bleibt Raum, mich bei all jenen zu bedanken, die mich während meines Studiums in Gießen, Poznań und Darmstadt sowie insbesondere während der Bearbeitung meiner Masterarbeit unterstützt haben.

Ich bedanke mich bei meinem Betreuer Herrn Martin Grüger, der mir von Seiten des Darmstädter Wasserversorgers *ENTEKA* in zahlreichen Sitzungen immer wieder Lösungsansätze zur Bewältigung der auftauchenden Schwierigkeiten geben konnte. Weiterhin danke ich Frau Christiane Wolle, die in der Abteilung P550 für die hydraulischen Simulationen mit STANET zuständig war und mir bei sämtlichen programmspezifischen und sonstigen technischen Problemen einen Ausweg aufzeigen konnte. Außerdem danke ich allen weiteren Kollegen der Abteilung P550, die mir mit detaillierter Netzkenntnis zur Seite gestanden und für ein angenehmes Arbeitsklima gesorgt haben.

Des Weiteren danke ich meiner Betreuerin Frau Sonja Geiß, die mich von Seiten des Instituts WAR organisatorisch unterstützt hat und den Kontakt zur *ENTEKA* und Herrn Grüger herstellen konnte. Ich bedanke mich bei meinem Prüfer Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Wilhelm Urban, der mir durch seine Anregungen half, die Qualität meiner Ergebnisse zu verbessern.

Für die wertvollen Beiträge zu meiner interdisziplinären Ausbildung möchte ich mich außerdem bei allen meinen Professorinnen und Professoren sowie bei meinen Vorgesetzten, für die ich während meiner Praktika in Göttingen und Ober-Mörlen tätig war, bedanken. Für die (noch wertvolleren?) Erfahrungen in allen anderen Lebenslagen, danke ich allen meinen Kommilitonen und Freunden, die mich vor und während meiner sechsjährigen Studienzeit begleitet haben. An dieser Stelle danke ich ausdrücklich meinen Freunden, die sich die Zeit genommen haben, diese Abhandlung gegenzulesen, um mich vor allzu großem Ungemach zu bewahren.

Der größte Dank gilt meiner Familie, die mich während der gesamten Studienzeit und bei insgesamt vier Umzügen ohne zu zögern mit vollem Körpereinsatz unterstützt hat. Besonders danke ich meinem Bruder Christoph für seine kritische Auseinandersetzung mit mir und insbesondere meiner Masterarbeit. Ganz besonderer Dank richtet sich an meine Eltern, die mir durch ihre uneingeschränkte Unterstützung alle Möglichkeiten gegeben haben, meinen eigenen Weg zu finden.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis.....	XII
1. Einleitung.....	1
1.1. Zielsetzung und Aufgabenstellung	2
1.2. Struktur der Arbeit	3
2. Grundlagen	5
2.1. Energieeinsparungen und Energieeffizienz in der Wasserversorgung	6
2.1.1. Definition Energieeinsparung und Energieeffizienz	6
2.1.2. Hierarchische Gliederung der Wasserversorgung und Einordnung der Fragestellung	6
2.1.3. Elektrischer Energiebedarf der Pumpen in der Druckerhöhung	7
2.1.4. Allgemeine Optimierungspotenziale in der Wasserversorgung	10
2.1.5. Optimierungspotenziale in der Druckerhöhung	11
2.2. STANET	15
2.2.1. Hydraulische Berechnungen	15
2.2.2. Netzkalibrierung	16
2.3. Darmstädter Wasserversorgung und ALT-Zustand	17
2.4. SOLL-Zustand	21
2.5. Mögliche Sanierung und Integration der DEA MATH	26
3. Untersuchungsmethodik.....	27
3.1. Datengrundlage und Datenqualität	29
3.1.1. Datenerfassung und Datenabfragesysteme der <i>ENTEGA</i> und <i>Hessenwasser</i>	29
3.1.2. Kundenverbrauchsabrechnung der HZs 2012	32

3.1.3. Kundenverbrauchsabrechnungen umliegender Gemeinden 2012 und 2013	32
3.1.4. Leistungsprüfung	32
3.1.5. Leistungsmessung: Messung des Gesamtwirkungsgrades der DEA OETI	33
3.2. Elektrischer Energiebedarf ALT-Zustand	34
3.2.1. Energiebedarf der Druckerhöhungsanlagen 2013	34
3.2.2. Energiebedarf zur Versorgung der Hochzonen	37
3.2.3. Plausibilitätsprüfung	38
3.3. Grundsätzliche Überlegung zur Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs im SOLL-Zustand	40
3.4. Lastprofil	41
3.4.1. Extrapolation und Klassifizierung	41
3.4.2. Einordnung der Jahresfördermenge 2013 in den üblichen Wasserverbrauch der Stadt Darmstadt	42
3.5. Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade	43
3.5.1. Funktion $f(Q)$ und Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade der DEAs HEIN und OETI	43
3.5.2. Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade der DEA MATH	44
3.6. Voraussetzungen zur Ermittlung der Förderhöhe über STANET	46
3.6.1. Kalibrierung des Rechnernetzmodells und Genauigkeit der Simulationen	47
3.6.2. Vordrucksituation der DEAs	47
3.6.3. Sonstige Anpassungen am Rechnernetzmodell und der Simulationsvorgaben	49
3.7. Elektrischer Energiebedarf SOLL-Zustand und Pumpensteuerung	51
3.7.1. Ermittlung des Energiebedarfs verschiedener Pumpensteuerungen	51
3.7.2. Bestimmung der Vertrauensbereiche	52
3.7.3. Bestimmung der Pumpensteuerung	52
3.7.4. Sensitivitätsanalyse	53
3.8. Investitionsrechnung zur möglichen Integration der DEA MATH	54
3.8.1. Die Annuitätenmethode	54
3.8.2. Sensitivitätsanalyse	55
3.9. Suche nach weiterem energetischen Optimierungspotenzial	56

4.	Ergebnisse	58
4.1.	Elektrischer Energiebedarf ALT-Zustand.....	60
4.1.1.	Fördermengen und Energiebedarf zur Versorgung der HZs im Jahr 2013.....	60
4.1.2.	Plausibilitätsprüfung.....	62
4.2.	Lastprofil.....	65
4.2.1.	Ergebnisse der Extrapolation zur Erstellung des Lastprofils.....	65
4.2.2.	Einordnung der Jahresfördermenge 2013 in den üblichen Wasserverbrauch der Stadt Darmstadt	67
4.3.	Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade	68
4.3.1.	Funktion $f(Q)$ und Gesamtwirkungsgrade der DEAs OETI und HEIN	68
4.3.2.	Gesamtwirkungsgrade der DEA MATH	69
4.4.	STANET	70
4.4.1.	Kalibrierung des Rechnetzmodells und Genauigkeit der Simulationen	70
4.4.2.	Vordruckanalyse: Ermittlung der in STANET angesetzten Vordrucke	70
4.4.3.	Berücksichtigung der niederzonenseitigen Druckverluste	72
4.5.	Elektrischer Energiebedarf SOLL-Zustand und Pumpensteuerung.....	73
4.5.1.	Vergleich der DEAs HEIN und OETI.....	75
4.5.2.	Vergleich des Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen.....	76
4.5.3.	Pumpensteuerung	79
4.5.4.	Sensitivitätsanalyse: Pumpenwirkungsgrad.....	79
4.6.	Ergebnisse der Investitionsrechnung zur möglichen Integration der DEA MATH.....	81
4.6.1.	Rahmenbedingungen	81
4.6.2.	Ergebnisse der Annuitätenmethode und Sensitivitätsanalysen.....	83
4.7.	Suche nach weiterem Optimierungspotenzial.....	84
4.7.1.	Förderhöhenabsenkung und vorzeitige Investitionen in Rohrsanierung	84
4.7.2.	Ergebnisse der Untersuchung des Rohrnetzes hinsichtlich des druckverlustbedingtem Optimierungspotenzials	85
5.	Diskussion und Schlussfolgerungen.....	87
5.1.	Diskussion der Ergebnisse zum elektrischen Energiebedarf des ALT-Zustandes.....	88
5.1.1.	HZ2a und MZ_{ALT}	88

5.1.2. HZ3b.....	88
5.1.3. HZ3a	88
5.2. Diskussion der Ergebnisse zum elektrischen Energiebedarf des SOLL-Zustandes.....	92
5.2.1. Regelung des Netzdrucks und Begreifen der Ergebnisse als Potenzial.....	93
5.2.2. Lastprofil	95
5.2.3. Vordrucksituation der DEAs	97
5.2.4. Pumpensteuerung	99
5.3. Diskussion der Ergebnisse zur Investitionsrechnung.....	104
5.3.1. Zukünftige Zahlungsströme und Strompreisentwicklung	104
5.3.2. Zinssatz und vollkommener Kapitalmarkt.....	105
5.3.3. Abschließende Bewertung der Investitionsrechnung	105
6. Handlungsempfehlungen.....	106
6.1. Druckmesser und Wasserzähler	107
6.2. Unplausible Fördermengen der HZ3a.....	108
6.3. Investition in erweiterte Mess- und Regeltechnik sowie Entwicklung einer Pumpensteuerung.....	109
6.4. Investition in die Sanierung der DEA MATH	110
6.4.1. n-1-Prinzip.....	110
6.4.2. Ermittlung des maßgebenden Spitzenlastfalls	110
6.5. Weiteres Optimierungspotenzial.....	112
6.5.1. Wasserverluste.....	112
6.5.2. Ausnutzung von Schwachlastpreisen (Nachtstrom)	112
6.6. Nutzung der Ergebnisse zur Umsetzung der ISO 50001	113
7. Zusammenfassung.....	114
Literaturverzeichnis.....	117
Anhang	XV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Hierarchie der Wasserversorgung nach energetischen Gesichtspunkten (DVGW-Information W Nr.77, S. 1)	7
Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Motorleistung und Motorwirkungsgrad der Effizienzklassen (IE1, IE2, IE3) für Drehstrom-Asynchronmotoren gemäß IEC 600034-30 (Brunner 2009)	12
Abbildung 3: Q-H-Diagramm: Betriebspunkt als Schnittpunkt von Anlagen- und Pumpenkennlinie, hier „Drosselkurve“ genannt (Neumaier 1994)	12
Abbildung 4: Druckverlusthöhe in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit (DVGW-Information W Nr.77, S. 92)	14
Abbildung 5: Darstellung der Druckzonen des ALT-Zustandes (nach Grüger 2015).....	18
Abbildung 6:Fließbild des Druckzonenkonzepts des ALT-Zustandes mit den DMAs: HEIN HZ 2a + HEIN 3a (1), BRES (2), JAHN (3), KLAP (4), HDEL (5); sowie dem ÜSV HEIH (6) (nach Grüger 2015)	20
Abbildung 7: Darstellung der Druckzonen des SOLL-Zustandes (nach Grüger 2015)	22
Abbildung 8: Fließbild des Druckzonenkonzepts des SOLL-Zustandes (nach Grüger 2015)	24
Abbildung 9: Mögliche Nutzung der DEA MATH mit zwei Pumpen á 90 m³/h, ohne FU (Grüger 2015).....	26
Abbildung 10: Darstellung der Datenabfragesysteme der relevanten Anlagen.....	30
Abbildung 11: Darstellung der im Jahr 2013 in die HZs geförderten Wassermengen.....	60
Abbildung 12: Darstellung des im Jahr 2013 zur Versorgung der einzelnen HZs ermittelten Energiebedarfs.....	61
Abbildung 13: Darstellung des im Jahr 2013 zur Versorgung der einzelnen HZs ermittelten spezifischen Energiebedarfs	61
Abbildung 14: Lastprofil der MZ_{SOLL} extrapoliert aus den Förderströmen der HZs 2a+3a aus dem Jahre 2013.....	66
Abbildung 15: Funktion $f(Q)$ als Verhältnis von gemessenem Gesamtwirkungsgrad zum Pumpenwirkungsgrad in Abhängigkeit des Förderstroms.....	69
Abbildung 16: Gegenüberstellung des Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen bei einem Förderstrom von $Q = 75 \text{ m}^3/\text{h}$	76
Abbildung 17: Gegenüberstellung des Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen bei einem Förderstrom von $Q = 175 \text{ m}^3/\text{h}$	77
Abbildung 18: Gegenüberstellung des Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen bei einem Förderstrom von $Q = 275 \text{ m}^3/\text{h}$	77
Abbildung 19:Gegenüberstellung des Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen bei einem Förderstrom von $Q = 375 \text{ m}^3/\text{h}$	78

Abbildung 20: Gegenüberstellung des Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen bei einem Förderstrom von $Q = 475 \text{ m}^3/\text{h}$	78
Abbildung 21: Gegenüberstellung des gesamten Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen	79
Abbildung 22: Gegenüberstellung des Jahresenergiebedarfs bei alleiniger Versorgung durch die DEA HEIN bei unterschiedlichen Pumpenwirkungsgraden	80
Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Förderhöhenabsenkung, sinkende Energiekosten und Rohrleitungslänge	85
Abbildung 24: Messwertabweichung der magnetisch-induktiven Durchflussmessung (Fischer&Porter GmbH 1993)	XVIII
Abbildung 25: Im Vordergrund, IDM-Zähler der DEA HEIN HZ1; im Hintergrund, IDM-Zähler der DMA HEIN HZ2a+3a und Monozähler der DMA HEIN HZ2a	XIX
Abbildung 26: IDM-Zähler der DMA HEIN HZ2a+3a, DN 150	XIX
Abbildung 27: Monozähler der DMA HEIN HZ2a; DN 100	XIX
Abbildung 28: Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN (1 Pumpe) (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015b)	XXI
Abbildung 29: Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN (2 Pumpen) (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015b)	XXII
Abbildung 30: Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN (3 Pumpen) (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015b)	XXIII
Abbildung 31: Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN (4 Pumpen) (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015b)	XXIV
Abbildung 32: Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN (5 Pumpen) (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015b)	XXV
Abbildung 33: Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN (6 Pumpen) (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015b)	XXVI
Abbildung 34: Pumpenkennlinien und Wirkungsgrade der verfügbaren Pumpenausführungen zur Ausrüstung der DEA MATH (nach Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015d)	XXIX
Abbildung 35: Gegenüberstellung der errechneten Pumpen- und gemessenen Gesamtwirkungsgrade	XXXI
Abbildung 36: Offset (Palotas 2003, S. 132)	XL
Abbildung 37: Strömungsverhältnisse in der MZ_{SOLL} beim Lastfall $Q=75 \text{ m}^3/\text{h}$; Versorgung über DEAs HEIN und OETI; Mindestnetzdruck = 3,4bar	L
Abbildung 38: Strömungsverhältnisse in der MZ_{SOLL} beim Lastfall $Q=175 \text{ m}^3/\text{h}$; Versorgung über DEAs HEIN und OETI; Mindestnetzdruck = 3,4bar	L
Abbildung 39: Strömungsverhältnisse in der MZ_{SOLL} beim Lastfall $Q=275 \text{ m}^3/\text{h}$; Versorgung über DEAs HEIN und OETI; Mindestnetzdruck = 3,4bar	L

Abbildung 40: Strömungsverhältnisse in der MZ_{SOLL} beim Lastfall $Q=375 \text{ m}^3/\text{h}$; Versorgung über DEAs HEIN und OETI; Mindestnetzdruck = 3,4bar	L
Abbildung 41: Strömungsverhältnisse in der MZ_{SOLL} beim Lastfall $Q=475 \text{ m}^3/\text{h}$; Versorgung über DEAs HEIN und OETI; Mindestnetzdruck = 3,4bar	L
Abbildung 42: Strömungsverhältnisse und Druckverluste in der MZ_{SOLL} beim Lastfall $Q=275 \text{ m}^3/\text{h}$; Versorgung über DEAs HEIN und OETI; Mindestnetzdruck = 3,4bar	L
Abbildung 43: Strömungsverhältnisse und Druckverluste in der MZ_{SOLL} beim Lastfall $Q=275 \text{ m}^3/\text{h}$ nachdem 2350 m Leitung mit den höchsten Druckverlusten „saniert“ wurden; Versorgung über DEAs HEIN und OETI; Mindestnetzdruck = 3,4bar	L

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versorgung tiefer gelegener HZs durch die HZ1 über DMAs	19
Tabelle 2: Differenz zwischen den im Jahr 2013 in die HZs geförderten und den dort im Jahr 2012 verbrauchten Mengen	62
Tabelle 3: Differenzen zwischen der Wasserabgabe an Haushalte und Kleingewerbe der umliegenden Gemeinden aus den Jahren 2012 und 2013.....	63
Tabelle 4: Differenz zwischen dem ermittelten und dem vom Versorger in Rechnung gestellten Energiebedarf der DEAs aus dem Jahre 2013.....	64
Tabelle 5: MZ_{SOLL} extrapoliert aus HZ2a + 3a 2013	65
Tabelle 6: Seit der Jahrtausendwende veröffentlichte Daten zur Wasserabgabe der Haushalte und Kleingewerbe der Stadt Darmstadt (Jahre 2001 - 2010 aus: Wissenschaftsstadt Darmstadt 2015, Kapitel 12.14; Jahr 2013 aus: Hessisches Statistisches Landesamt 2015)	67
Tabelle 7: Gemessene Gesamtwirkungsgrade, dazugehörige Pumpenwirkungsgrade und Wirkungsgradverhältnis	68
Tabelle 8: Ermittelte Gesamtwirkungsgrade und Wirkungsgradverhältnisse der DEA MATH	69
Tabelle 9: Für die Simulationen verwendete Vordrucke.....	71
Tabelle 10: Abkürzung und Erläuterung der verglichenen Pumpensteuerungen	74
Tabelle 11: Zu tätige Investitionen in die DEA MATH	81
Tabelle 12: Jährliche Kosten der DEA MATH	82
Tabelle 13: Annahmen zur Durchführung der Annuitätenmethode zur wirtschaftlichen Bewertung der Integration der DEA MATH.....	82
Tabelle 14: Kapitalwert und Überschuss-Annuität der Investition in die Integration der DEA MATH	83
Tabelle 15: Druckhöhenentwicklung an unterschiedlichen Punkten im Netzmodell durch die Sanierung von 2350 m Rohrleitung.....	86
Tabelle 16: Zählerart, Datenabfragesystem und die Zuständigkeit der Zählerbetreuung der DEA (nach: ENTEGA 2015).....	XVI
Tabelle 17: Zählerart, Datenabfragesystem und die Zuständigkeit der Zählerbetreuung der DMA (nach: ENTEGA 2015).....	XVI
Tabelle 18: Gesonderte Ergebnisse der hydraulischen Leistungsprüfung (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015c)	XXVII
Tabelle 19: Auswertung der Leistungsmessung vom 09.12.2014 (nach Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015a).....	XXX
Tabelle 20: Ermittelte Gesamtwirkungsgrade und Wirkungsgradverhältnisse der DEAs HEIN und OETI.....	XXXII

Tabelle 21: Ausgewählte Stundenwerte zur Analyse der Vordrucksituation	XXXVIII
Tabelle 22: Fördermengen und Ausgangsdrücke der alten DEAs.....	XLII
Tabelle 23: Einstell-Solldrücke der DMAs nach Jahreswasserbericht 2013 (siehe ENTEGA 2014, S. 22)	XLII
Tabelle 24: Fördermengen, Energiebedarf und spezifischer Energiebedarf der DEAs 2013	XLIII
Tabelle 25: Fördermengen der DMAs 2013.....	XLIII
Tabelle 26: Fördermengen, Energiebedarf und spezifischer Energiebedarf der HZs 2013.....	XLIII
Tabelle 29: Jahresenergiebedarf zur Versorgung der MZ _{SOLL} ; Pumpensteuerung OETI.....	XLIV
Tabelle 30: Jahresenergiebedarf zur Versorgung der MZ _{SOLL} ; Pumpensteuerung HEIN	XLIV
Tabelle 31: Jahresenergiebedarf zur Versorgung der MZ _{SOLL} ; Pumpensteuerung HEIN+OETI (η opt.).....	XLV
Tabelle 32: Jahresenergiebedarf zur Versorgung der MZ _{SOLL} ; Pumpensteuerung HEIN+OETI (hyd opt.)	XLV
Tabelle 33: Jahresenergiebedarf zur Versorgung der MZ _{SOLL} ; Pumpensteuerung HEIN+OETI+MATH 90 (η opt.)	XLVI
Tabelle 34: Jahresenergiebedarf zur Versorgung der MZ _{SOLL} ; Pumpensteuerung HEIN+OETI+MATH 180 (η opt.)	XLVII
Tabelle 35: Sensitivitätsanalyse; Jahresenergiebedarf zur Versorgung der MZ _{SOLL} ; Pumpensteuerung HEIN ($\eta_{Pu} = 70 \%$).....	XLVIII
Tabelle 36: Ermittelte Wirkungsgrade und Wirkungsgradverhältnisse der Sensitivitätsanalyse ($\eta_{Pu} = 70 \%$)	XLVIII

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen allgemein

ca.	circa
DEA	Druckerhöhungsanlage
DIN	freiwilliger Standard, nationale Ebene
DMA	Druckminderungsanlage
d.h.	das heißt
EDL	Energiedienstleistungsgesetz
EMAS	„Eco Management and Audit Scheme“ nach: Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates
EnMS	Energiemanagementsystem
EN	freiwilliger Standard, internationale Ebene
en	englisch
ff	folgende (bezogen auf eine Seitenangabe)
FU	Frequenzumrichter
HB	Hochbehälter
<i>HW</i>	<i>Hessenwasser</i>
HZ	Hochzone
IDM	Induktive Durchflussmessung
ISO	freiwilliger Standard, internationale Ebene
LZH	Leitzentrale Hessenwasser
Mono	Monozähler
MZ _{ALT}	alte Mittelzone
MZ _{SOLL}	neue Mittelzone
NRA	Nieder-Ramstadt
NZ	Niederzone
ORA	Ober-Ramstadt
QVL	Quer-Verbund-Leitstelle
S.	Seite
sog.	sogenannt
<i>Sensus</i>	externer Dienstleister Zählwertfunkübertragung
TRA	Traisa
u.v.m.	und vieles mehr
Verbund	Verbundzähler
vgl.	vergleiche

WVU	Wasserversorgungsunternehmen
z.B.	zum Beispiel

Druckerhöhungsanlagen

HEIN HZ1	Heinrichstraße Hochzone 1 (ALT)
HEIN MZ	Heinrichstraße alte Mittelzone (ALT)
HEIN	Heinrichstraße neue Mittelzone (SOLL)
MARI	Marienhöhe
MATH	Mathildenhöhe (bis 2014 ebenfalls Wärmepumpe der Stadt)
OBER	Oberfeld

Druckminderungsanlagen

BRES	Breslauer Platz
HEIN HZ2a	Heinrichstraße Hochzone 2a
HEIN HZ3a	Heinrichstraße Hochzone 3a
HDEL	Heinrich-Delp-Straße
JAHN	Jahnstraße
KLAP	Klappacherstraße

Überströmventil

ÜSV HEIH	Überströmventil Heinheimerstraße
----------	----------------------------------

Formelzeichen

a	[€/a]	Annuität
A	[€]	Auszahlung
D	[m], [mm]	Rohrinnendurchmesser
δ	[mm]	Grenzschichtdicke
e	[kWh/m ³]	spezifischer Energiebedarf
E	[kWh]	Energie
E	[€]	Einzahlung
η	[%]	Wirkungsgrad
f	[-]	Klassenhäufigkeit
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Druckverlusthöhe/geodätische Höhe
H	[m]	Förderhöhe
i	[%]	Diskontierungszinssatz
k	[mm]	Rauheit
k	[-]	Klasse
K_0	[€]	Kapitalwert
L	[m]	Rohrleitungslänge
L	[€]	Liquidationserlös
λ	[-]	Widerstandsbeiwert (Reibungszahl)
n	[1/min]	Drehzahl
n	[a]	Nutzungsdauer
N	[-]	Anzahl
p	[Pa], [bar]	Druck
Δp	[N/m ²], [bar]	Druckverlust
P	[W]	Leistung
q	[m ³ /m ³]	Extrapolationsquotient
Q	[m ³ /h]	Volumenstrom/Förderstrom
Re	[-]	Reynolds-Zahl
ρ	[kg/m ³]	Dichte
ν	[kg/m·s]	kinematische Viskosität
v	[m/s]	Geschwindigkeit
V	[m ³]	Volumen
t	[s], [h], [a]	Zeit
T	[h]	Betriebsdauer

1. Einleitung

Die Reduktion von Treibhausgasemissionen und die Steigerung der Energieeffizienz ist ein Ziel, das sich die deutsche Politik zu Beginn des 21. Jahrhundert gesetzt hat. In der Novelle des Energiedienstleistungsgesetzes EDL vom 15.04.2015 werden Unternehmen in Deutschland ab einer bestimmten Unternehmensgröße dazu verpflichtet, ein Energieaudit einzuführen und dieses regelmäßig zu wiederholen (EDL-G 2015). Das Energieaudit muss den Anforderungen der DIN EN 16247-1 entsprechen. Alternativ dazu können Unternehmen mit mehreren Unternehmensteilen ein Energiemanagementsystem (EnMS) nach ISO 50001 oder ein Umweltmanagementsystem nach EMAS einführen. Dabei reicht es aus, zwischen dem 05.12.2015 und dem 31.12.2016 den Nachweis zu erbringen, mit der Einrichtung eines solchen Systems begonnen zu haben.

Zusätzlich zu den politischen Vorgaben verlangen steigende Energiekosten von den Unternehmen, energieintensive Betriebsprozesse zu optimieren. In einem Wasserversorgungsunternehmen (WVU) wird der größte Teil des Energiebedarfs für die Wasserförderung aufgewendet (Mutschmann und Stimmelmayer 2007, S. 325). Die Wasserförderung erfolgt üblicherweise durch Kreiselpumpen. Im Mittel liegt der spezifische Energiebedarf in der deutschen Wasserversorgung bei 0,5 kWh pro gefördertem Kubikmeter Wasser (Plath und Wichmann 2009 b).

Das Darmstädter WVU *ENTEKA* befasst sich seit dem Jahr 2010 mit der Sanierung der Wasserversorgung der geodätisch höher gelegenen Stadtgebiete. Diese Gebiete werden über mehrere Hochzonen (HZs) versorgt. Neben den notwendigen Erneuerungen der Pumpenanlagen umfassen die Sanierungsmaßnahmen auch eine energetische Optimierung, um den spezifischen Energiebedarf zu reduzieren und damit Energiekosten zu senken.

Gleichzeitig soll mit der Sanierung die Umsetzung der oben genannten gesetzlichen Verpflichtungen zur energetischen Analyse und Optimierung der betrieblichen Prozesse beginnen. Die *ENTEKA* unterwirft sich dazu dem EnMS ISO 50001. „Diese internationale Norm basiert auf dem als PDCA-Zyklus (en: Plan-Do-Check-Act) bekannten kontinuierlichen Verbesserungsprozess und integriert das Energiemanagement in das Tagesgeschäft der Organisation“ (ISO 50001, S. 5). Um ab dem 05.12.2015 den Nachweis zu erbringen, dass mit der Einrichtung der ISO 50001 begonnen wurde, muss das WVU die derzeitigen Energiequellen ermitteln und den bisherigen sowie aktuellen Energieeinsatz und -verbrauch bewerten (EDL-G 2015, S. 7; ISO 50001, S. 13).

1.1. Zielsetzung und Aufgabenstellung

Diese Arbeit befasst sich mit der energetischen Optimierung der Darmstädter Wasserversorgung. Dabei werden die Darmstädter HZs betrachtet, deren Wasserversorgungskonzept zwischen den Jahren 2013 und 2017 durch Sanierungsmaßnahmen modernisiert wird. Im Rahmen der oben genannten gesetzlichen Verpflichtungen zur energetischen Analyse und Optimierung der betrieblichen Prozesse sollen die Ergebnisse dieser Arbeit zur Etablierung der ISO 50001 beitragen. Weiterhin sollen weitere Einsparpotenziale aufgedeckt und dem WVU Handlungsempfehlungen gegeben werden, durch deren Umsetzung die betrieblichen Prozesse verbessert werden können. Diese Ziele werden in der folgenden Aufgabenstellung konkretisiert.

Aufgabenstellung

Zuerst wird der Energiebedarf zur Versorgung des Gebiets vor und nach der Optimierung berechnet, um das Einsparpotenzial der Sanierungsmaßnahmen zu ermitteln. Der Zustand des Gebiets vor der Optimierung wird mit dem Begriff ALT-Zustand und nach der Optimierung mit SOLL-Zustand bezeichnet. Ferner soll ein System zur Pumpensteuerung vorgeschlagen werden, um den Energiebedarf der Druckerhöhungsanlagen (DEAs) nach der Umsetzung der Sanierungsmaßnahmen minimal zu halten. Darüber hinaus wird mit Hilfe einer Investitionsrechnung die Wirtschaftlichkeit einer potenziellen Investition in eine zusätzliche DEA ermittelt. Abschließend soll das Versorgungsgebiet auf weiteres energetisches Potenzial hin untersucht werden.

1.2. Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel. Beginnend mit der Einleitung, in welcher der Hintergrund und die Ziele der Arbeit dargelegt werden, folgt mit Kapitel 2 das Grundlagenkapitel. In diesem wird in das Gebiet „Energieeinsparungen und Energieeffizienz in der Wasserversorgung“ (Unterkapitel 2.1) und das Netzberechnungsprogramm STANET (Unterkapitel 2.2) eingeführt. Mit diesem Programm werden die hydraulischen Simulationen in dieser Arbeit vorgenommen. Weiterhin wird das von den Sanierungsmaßnahmen betroffene Untersuchungsgebiet vorgestellt (Unterkapitel 2.3 sowie 2.4) und auf die Überlegung des WVUs eingegangen, zusätzlich zu den geplanten Investitionen in die Sanierung von zwei DEAs in die Sanierung einer dritten DEA zu investieren (Unterkapitel 2.5).

In Kapitel 3 werden die Methoden vorgestellt, mit denen die Aufgabenstellung dieser Arbeit bearbeitet wird. Dabei wird zuerst die Datenlage erläutert (Unterkapitel 3.1) und die Methode zur Ermittlung des Energiebedarfs des ALT-Zustandes vorgestellt (Unterkapitel 3.2). Anschließend folgt die grundsätzliche Überlegung zur Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs im SOLL-Zustand (Unterkapitel 3.3) und die Vorstellung der Vorgehensweise zur Erstellung eines ganzjährigen Lastprofils (Unterkapitel 3.4), zur Bestimmung der Gesamtwirkungsgrade (Unterkapitel 3.5) sowie zur Ermittlung der Förderhöhen (Unterkapitel 3.6). Danach wird dargelegt, auf welche Weise der Energiebedarf des SOLL-Zustandes mit Hilfe des Lastprofils, der Gesamtwirkungsgrade sowie der Förderhöhen ermittelt und eine Pumpensteuerung bestimmt werden soll, die den Energiebedarf minimiert (Unterkapitel 3.7). Abschließend wird die Durchführung einer Investitionsrechnung zur möglichen Integration der DEA MATH erläutert (Unterkapitel 3.8) und dargelegt, wie bei der Suche nach weiterem Optimierungspotenzial vorgegangen wird (Unterkapitel 3.9).

In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Arbeit beginnend mit dem Energiebedarf des ALT-Zustandes (Unterkapitel 4.1) in Form von Tabellen und Abbildungen vorgestellt. Ausgehend von der zuvor ermittelten Rohrnetzeinspeisung wird das ganzjährige Lastprofil dargestellt (Unterkapitel 4.2). Anhand von Leistungsdaten der neuen Pumpenanlagen werden die Gesamtwirkungsgrade der DEAs berechnet (Unterkapitel 4.3). Danach werden die Ergebnisse und die im Rechnetzmodell vorgenommenen Veränderungen vorgestellt, die bei den anschließenden Simulationen die Förderhöhe beeinflussen (Unterkapitel 4.4). Mit Hilfe des Lastprofils, den Gesamtwirkungsgraden sowie den von den Förderströmen abhängigen Förderhöhen wird der Energiebedarf des SOLL-Zustandes berechnet (Unterkapitel 4.5). Abschließend werden die Ergebnisse der Investitionsrechnung zur möglichen Integration der DEA MATH (Unterkapitel 4.6) und die Ergebnisse der Suche nach weiterem Optimierungspotenzial vorgestellt (Unterkapitel 4.7).

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Arbeit diskutiert und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen vorgestellt. Dabei wird zunächst auf die Plausibilität des ermittelten Energiebedarfs des ALT-Zustandes eingegangen (Unterkapitel 5.1).

Danach werden die Ergebnisse des Energiebedarfs des SOLL-Zustandes vor dem Hintergrund der verwendeten Methoden diskutiert und ein Ansatz entwickelt, mit dem eine weitere Betriebsoptimierung erfolgen kann (Unterkapitel 5.2). Abschließend wird das Ergebnis der Investitionsrechnung zur möglichen Integration der DEA MATH diskutiert (Unterkapitel 5.3).

In Kapitel 6 werden aus den Ergebnissen und der Diskussion Handlungsempfehlungen für das WVU abgeleitet und vorgestellt. Zu Beginn werden Empfehlungen in Bezug auf die im Rohrnetz eingebundene Messtechnik (Unterkapitel 6.1) sowie auf die Überprüfung bestimmter Rohrnetzabschnitte auf zu hohe Wasserverluste gegeben (Unterkapitel 6.2). Anschließend wird dargelegt, wann aus wirtschaftlicher Sicht zusätzliche Investitionen in ein erweitertes Mess- und Regelsystem und die Entwicklung einer Pumpensteuerung gerechtfertigt sind (Unterkapitel 6.3). Daraufgehend wird erläutert, nach welchen Kriterien über die Investition in die Sanierung der DEA MATH entschieden werden sollte (Unterkapitel 6.4). Abschließend werden Empfehlungen zur Suche und Ausnutzung weiterer Optimierungspotenziale (Unterkapitel 6.5) sowie Empfehlungen in Bezug auf die Implementierung der ISO 50001 gegeben (Unterkapitel 6.6).

In Kapitel 7 werden die Ergebnisse aus den Berechnungen und der Diskussion gemeinsam mit den Handlungsempfehlungen zusammengefasst.

2. Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die grundlegenden Hintergründe dieser Masterarbeit vorgestellt. Dabei wird in Unterkapitel 2.1 in das Gebiet „Energieeinsparungen und Energieeffizienz in der Wasserversorgung“ eingeführt. Zunächst werden begriffliche Definitionen erläutert und eine Einordnung der Fragestellung in den Bereich der Wasserversorgung vorgenommen. Es folgt die Vorstellung der theoretischen Grundlagen zur Ermittlung des Leistungsbedarfs der Pumpen in der Wasserversorgung. Abschließend werden die für diese Arbeit relevanten und in der Literatur erwähnten Optimierungspotenziale aufgeführt.

Im darauffolgenden Unterkapitel 2.2 wird in das Netzberechnungsprogramm STANET eingeführt. Mit diesem Programm wird ein Teil der in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse ermittelt. Bei der Einführung in das Programm werden die grundlegenden Funktionen, Hintergründe und hinterlegten Formeln vermittelt.

In den Unterkapitel 2.3 und 2.4 wird das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit vorgestellt. Das Untersuchungsgebiet umfasst die von den Sanierungsmaßnahmen betroffenen Darmstädter HZs. In Unterkapitel 2.3 wird der ALT-Zustand des Netzes erläutert. Dieser beschreibt den vor Beginn der Bauarbeiten vorgelegenen Ausgangszustand des Netzes. In Unterkapitel 2.4 werden anschließend die geplanten Erneuerungen und die sich daraus ergebenden Vorteile des SOLL-Zustandes vorgestellt.

In Unterkapitel 2.5 wird auf die mögliche Sanierung der DEA MATH eingegangen. Über die Umsetzung dieser Teilmaßnahme wurde bislang noch nicht entschieden. Durch die Integration der DEA MATH als zusätzliche, dritte DEA soll die Versorgungssicherheit erhöht werden. Weiterhin wird vermutet, dass sich energetische Vorteile bieten.

2.1. Energieeinsparungen und Energieeffizienz in der Wasserversorgung

Im folgenden Unterkapitel wird eine Übersicht über Energieeinsparungen und Energieeffizienz in der Wasserversorgung gegeben. Zunächst wird eine Unterscheidung zwischen den Begriffen Energieeinsparung und Energieeffizienz vorgenommen. Es folgt eine hierarchische Gliederung der Wasserversorgung nach dem Energiebedarf und die Einordnung der in dieser Arbeit behandelten Fragestellung. Dazu werden die notwendigen theoretischen Grundlagen der Druckerhöhung vorgestellt. Abschließend werden die in der Literatur beschriebenen Optimierungspotenziale aufgeführt, die für diesen Teil der Wasserversorgung erwähnt werden.

2.1.1. Definition Energieeinsparung und Energieeffizienz

Die Energieeffizienz wird in der ISO 50001 als ein Verhältnis zwischen einer erzielten Leistung und der eingesetzten Energie definiert (ISO 50001, S. 8). Das bedeutet, dass eine Verbesserung der Energieeffizienz durch eine Steigerung der erzielten Leistung bei gleichbleibender eingesetzter Energie möglich ist. Umgekehrt führt auch eine Verringerung der eingesetzten Energie bei gleichbleibender erzielter Leistung zu einer Verbesserung der Energieeffizienz.

Energieeinsparung bedeutet dagegen immer eine Verringerung der eingesetzten Energie. Verringern sich eingesetzte Energie und erzielte Leistung im gleichen Verhältnis, ist die durchgeführte Maßnahme zwar energieeinsparend aber nicht energieeffizient. Die Maßnahme ist energieeinsparend, weil die eingesetzte Energie verringert wird. Sie ist jedoch nicht energieeffizient, weil sich das Verhältnis von eingesetzter Energie und erzielter Leistung nicht verbessert (DVGW-Information W Nr.77, S. 10).

2.1.2. Hierarchische Gliederung der Wasserversorgung und Einordnung der Fragestellung

In der nach DVGW-Information W Nr.77 vorgenommenen Gliederung der Wasserversorgung nach energetischen Gesichtspunkten wird nur der elektrische Energiebedarf technischer Prozesse der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung mit einbezogen. Der Energiebedarf von Verwaltungsgebäuden und anderweitiger Energiebedarf wie z.B. Wärme oder Kraftstoff bleiben dabei unberücksichtigt.

In Abbildung 1 werden die einzelnen Komponenten der Wasserversorgung nach energetischen Gesichtspunkten gegliedert. Unter den oben getroffenen Voraussetzungen setzt sich die Wasserversorgung aus den Aufgabengebieten der Wasserwerke und der Wasserverteilung zusammen. Diese sind in Ebene 1 dargestellt. In Ebene 2 erfolgt eine Unterteilung in die einzelnen Bereiche des Wasserwerks und der Wasserverteilung. In Ebene 3 wird der Bereich der Wasseraufbereitung noch einmal spezifisch unterteilt.

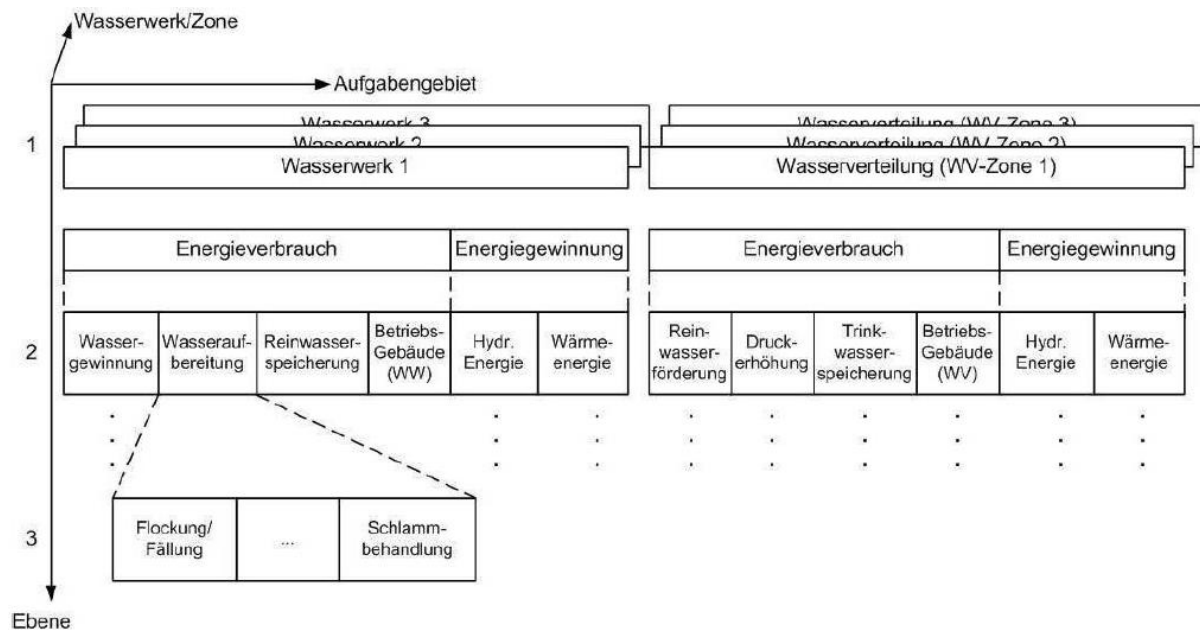


Abbildung 1: Hierarchie der Wasserversorgung nach energetischen Gesichtspunkten (DVGW-Information W Nr.77, S. 1)

In dieser Arbeit erfolgt eine energetische Betrachtung der geplanten Sanierungsmaßnahmen des WVU *ENTEGA* in Darmstadt. Die Sanierungsmaßnahmen betreffen die höher gelegenen Netzbereiche Darmstadts, die durch DEAs vom tiefer gelegenen Netz getrennt werden. „Druckerhöhungsanlagen [...] sind Förderanlagen innerhalb des Trinkwasserversorgungsnetzes. Sie sind den Förderanlagen der Wasserwerke nachgelagert und dienen der Versorgung von Netzbereichen, die aus dem vorhandenen System nicht mit ausreichendem Druck (und Volumenstrom) versorgt werden können“ (DVGW W 617, S. 6). Dadurch bilden sich Netzbereiche mit unterschiedlichen Drücken. Diese werden „Druckzonen“ (DZ) genannt (DVGW W 400-1 A, S. 17).

Auf Abbildung 1 bezogen, liegen die Optimierungspotenziale der Sanierungsmaßnahmen in der Druckerhöhung. Neben den DEAs werden in dieser Arbeit dazu auch die sich daran anschließenden Rohrnetze der Druckzonen betrachtet.

2.1.3. Elektrischer Energiebedarf der Pumpen in der Druckerhöhung

Zur Druckerhöhung werden Pumpen eingesetzt. Diese werden mit Hilfe von elektrischer Energie betrieben. Die in einer gewissen Zeit t aufgewendete elektrische Energie E_{el} ergibt sich aus der in dieser Zeit aufgebrauchten elektrischen Leistung P_{el} :

$$E_{el} = P \cdot t \text{ [kWh]} \quad (2.1)$$

Nach Mutschmann und Stimmelmayer errechnet sich der elektrische Leistungsbedarf P_{el} eines Pumpenaggregats aus der Förderhöhe H , dem Förderstrom Q und „allen elektrischen, mechanischen und hydraulischen Verlusten, die im Gesamtwirkungsgrad η_G zusammengefasst sind“ (Mutschmann und Stimmelmayer 2007, S. 327):

$$P_{el} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_G} [W] \quad (2.2)$$

Der Gesamtwirkungsgrad η_G setzt sich aus den folgenden Wirkungsgraden zusammen:

$$\eta_G = \eta_{Kabel} \cdot \eta_{FU} \cdot \eta_{Motor} \cdot \eta_{Kupplung} \cdot \eta_{Pumpe} [-] \quad (2.3)$$

mit

ρ	Dichte = 1.000 [kg/m³]
g	Erdbeschleunigung = 9,81 [m/s²]
η_{Kabel}	Wärmeverluste Energiekabel [-]
η_{FU}	Wärmeverluste Leistungselektronik (Frequenzumrichter) [-]
η_{Motor}	Mechanische Verluste und Wärmeverluste der Antriebsmaschine (z.B. Elektromotor) [-]
$\eta_{Kupplung}$	Mechanische Verluste der Kupplung zwischen Antriebsmaschine und Pumpe (z.B. nicht exakte Ausrichtung) [-]
η_{Pumpe} bzw. η_{Pu}	Mechanische und hydraulische Verluste der Pumpe [-]

Im weiteren Verlauf wird der Wirkungsgrad der Pumpe mit η_{Pu} abgekürzt.

Nach der Berechnung der Druckverlusthöhen h_v nach DARCY-WEISBACH ergibt sich die Förderhöhe H nach DVGW W 617 in der Wasserversorgung zu:

$$H = h_a - h_e + \frac{p_a - p_e}{\rho \cdot g} + \sum h_v [m] \quad (2.4)$$

$\sum h_v$ ist dabei die Summe aller Strömungswiderstände, die sich aus den Leitungen selbst und den Rohreinbauten (Armaturen, Messvorrichtungen, etc.) ergeben.

Die Druckverlusthöhe h_v der Leitungen ergibt sich zu:

$$h_v = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad [m] \quad (2.5)$$

mit

h_a	geodätische Höhe des Zielpunktes [m] (z.B. höchster Punkt im Netz)
h_e	geodätische Höhe der Pumpenanlage [m]
p_a	Druck am Zielpunkt [Pa]
p_e	Vordruck vor der Pumpenanlage [Pa]
Σh_v	Summe der Druckverlusthöhen in der Saug- und Druckleitung [m]
λ	Widerstandsbeiwert (Reibungsziffer von Rohren) [-]
L	Leitungslänge [m]
D	Durchmesser [m]
v	Geschwindigkeit [m/s]

Zur Abbildung der in Versorgungsleitungen zumeist vorkommenden turbulenten Strömungen im Übergangsbereich zwischen hydraulisch glatten und rauen Rohren wird die Formel von Prandtl-Colebrook verwendet. Mit ihr wird der Widerstandsbeiwert λ berechnet. Er hängt sowohl von der Reynolds-Zahl Re als auch der relativen Rauheit k ab (DVGW GW 303-1, S. 8-9):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{k}{3,71 \cdot D} \right) \quad (2.6)$$

Die Reynolds-Zahl ergibt sich zu:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad [-] \quad (2.7)$$

mit

k	Rauheit [mm]
ν	kinematische Viskosität = $1,793 \cdot 10^{-3}$ [kg/m·s]

Die Grenzschichtdicke δ der laminaren Grenzschicht ergibt sich zu (DVGW GW 303-1, S. 9):

$$\frac{k}{\delta} = 0,03 \frac{Re \sqrt{\lambda}}{D/k}; \quad \frac{\delta}{D} = \frac{32,8}{Re\sqrt{\lambda}} \quad (2.8)$$

2.1.4. Allgemeine Optimierungspotenziale in der Wasserversorgung

Im Folgenden werden Optimierungspotenziale in der Wasserversorgung kurz vorgestellt. Das Infoblatt DVGW-Information W Nr.77 gibt einen umfassenden Überblick über Optimierungspotenziale in der Wasserversorgung. Weiterhin werden dort Empfehlungen zur systematischen Erfassung und Ausschöpfung dieser Potenziale gegeben.

Zuerst werden Optimierungspotenziale vorgestellt, die neben dem Bereich der Druckerhöhung auch in allen anderen Teilen der Wasserversorgung vorhanden sind. Die Potenziale ergeben sich auf den Gebieten der Instandhaltung, der Schulung des Personals sowie im Bereich des Lastmanagements und der Wasserverluste.

Einleitend ist zu erwähnen, dass Optimierungspotenziale in der Wasserversorgung nur unter bestimmten Voraussetzungen ausgeschöpft werden dürfen. Für die Umsetzung kostensenkender Maßnahmen in der Wasserversorgung gilt generell, dass „diese

- sich nicht nachteilig auf Versorgungssicherheit und Wassergüte auswirken
- hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu überprüfen sind
- in einer einzelnen Anlage, z.B. Förderanlage, nicht zu unzulässigen oder unerwünschten Betriebszuständen in anderen Anlagenteilen führen
- den Schutz der Beschäftigten vor Unfall- oder Gesundheitsgefahren nicht beeinträchtigen.“
(DVGW W 611, S. 7)

Instandhaltung der Anlagen und Schulung des Personals

Anlagen können ihre optimale Leistung nur abrufen, wenn sie fachmännisch instandgehalten und betrieben werden. Durch gewissenhafte Instandhaltung der Anlagen und Schulung des Personals kann ein hoher Wirkungsgrad beim Betrieb der Anlagen erreicht werden. Ausfallzeiten aufgrund von Störungen werden reduziert. Auf das Thema Energiesparen sensibilisiertes Personal achtet darauf, dass nicht benötigte Geräte ausgeschaltet werden (DVGW-Information W Nr.77, S. 20).

Lastmanagement

Ein erfolgreiches Lastmanagement führt zu Energieeinsparungen im Betrieb. Die Vermeidung von Förderspitzen und eine Glättung des Lastprofils reduzieren die Fließgeschwindigkeiten und damit die Druckverluste (DVGW-Information W Nr.77, S. 20).

Bietet der zwischen Energieversorger und WVU ausgehandelte Stromtarif die Möglichkeit Schwachlastarbeitspreise zu nutzen, lohnt sich eine Anpassung des Lastprofils an den Stromtarif. Bei der Ausnutzung von Schwachlastpreisen müssen gegebenenfalls durch hohe Fördermengen auftretende Druckverluste berücksichtigt werden.

So kann das Ziel der Energieeinsparung durch Vergleichmäßigung der Fördermenge dem Ziel der Ausnutzung von Schwachlastpreisen entgegenstehen. Folglich muss vom WVU eine betriebswirtschaftliche Abwägung erfolgen (Kilchmann et al. 2004, S. 40-41).

Wasserverluste

Werden Wasserverluste reduziert, kann Energie bei der Wasseraufbereitung und -verteilung eingespart werden, da insgesamt weniger Wasser aufbereitet und verteilt werden muss.

2.1.5. Optimierungspotenziale in der Druckerhöhung

Pumpen stellen in der Wasserversorgung einen großen Energieverbraucher dar. Die Deutsche Energie-Agentur GmbH (Dena) und der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA) haben „im Rahmen der Kampagne ‚Energieeffiziente Systeme in Industrie und Gewerbe‘ [...] Unternehmen der Wasserwirtschaft bei der Optimierung der Pumpensysteme unterstützt. Im Mittel zeigten sich [...] Einsparpotentiale von rund 16 Prozent“ (Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH 2007). Dabei liegen die Optimierungspotenziale in der Betriebsweise und den hydraulischen Verhältnissen der Wasserverteilung. Darunter fallen die Ausstattung und der Betrieb der DEAs sowie das sich daran anschließende Rohrnetz. Im Folgenden werden Optimierungspotenziale in der Druckerhöhung aufgeführt.

Ersatz alter Pumpen und Ausstattung mit hocheffizienten Elektromotoren

Weichen die Wirkungsgrade der derzeit verwendeten Pumpen und Motoren nennenswert von denen neuerer Modelle ab, sollte ein Kosten-Nutzen-Vergleich über die Anschaffung neuer Pumpen und Motoren entscheiden. Seit 2008 regelt die internationale Norm IEC 60034-30 die Einteilung der in der Wasserversorgung häufig verwendeten Drehstrom-Asynchronmotoren in drei Effizienzklassen. Die Unterschiede der Motorenwirkungsgrade zwischen den drei Effizienzklassen liegen im Bereich von 2 - 10 %. Die Motorenwirkungsgrade sind von der Motorenleistung abhängig (DVGW-Information W Nr.77, S. 79). In Abbildung 2 ist der Zusammenhang zwischen Motorenleistung und Motorenwirkungsgrad der Effizienzklassen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Motorenwirkungsgrad mit der Motorenleistung steigt. Die drei Kurven zeigen den Zusammenhang zwischen Motorenleistung und Motorenwirkungsgrad für die drei Motoreffizienzklassen an (IE1 = Standard-Effizienzkategorie; IE2 = Hoch-Effizienzkategorie; IE3 = Premium-Effizienzkategorie).

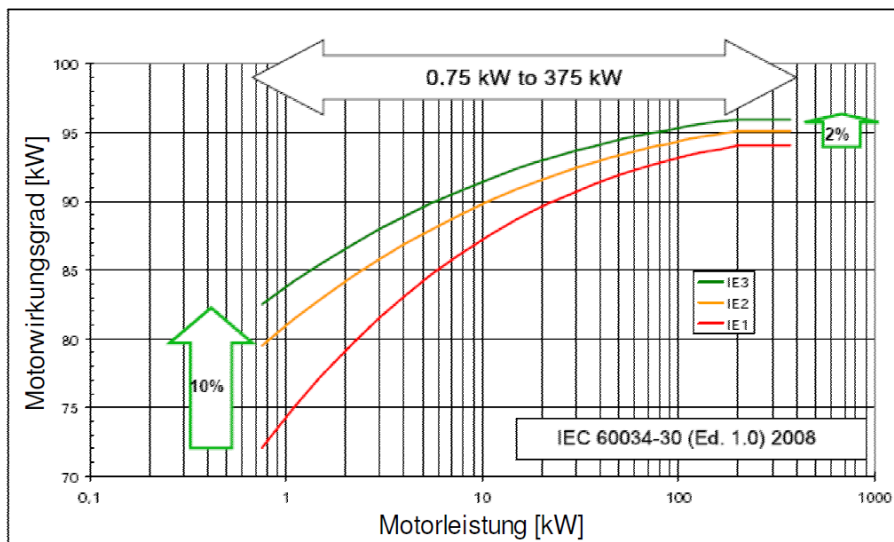


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Motorleistung und Motorwirkungsgrad der Effizienzklassen (IE1, IE2, IE3) für Drehstrom-Asynchronmotoren gemäß IEC 60034-30 (Brunner 2009)

Wirkungsgrad

Im Q-H-Diagramm der Abbildung 3 wird der Betriebspunkt durch den Schnittpunkt der Pumpen- und Anlagenkennlinie dargestellt. Die Pumpen- und Anlagenkennlinie zeigt den Verlauf der Förderhöhe H in Abhängigkeit der Förderstroms Q an. Die Pumpe ist dann optimal dimensioniert und eingestellt, wenn das Optimum des Pumpenwirkungsgrades mit dem Betriebspunkt der Pumpe zusammenfällt. Kreiselpumpen mit konstanter Drehzahl verfügen über genau einen optimalen Betriebspunkt. Schwankende hydraulische Bedingungen im täglichen Betrieb sorgen dafür, dass der Betriebspunkt über den Tag hinweg mehr oder weniger weit vom optimalen Betriebspunkt entfernt liegt. Die Pumpe operiert in diesem Fall im Teil- oder Überlastbetrieb. Dadurch sinkt der Pumpenwirkungsgrad und mit ihm die Energieeffizienz.

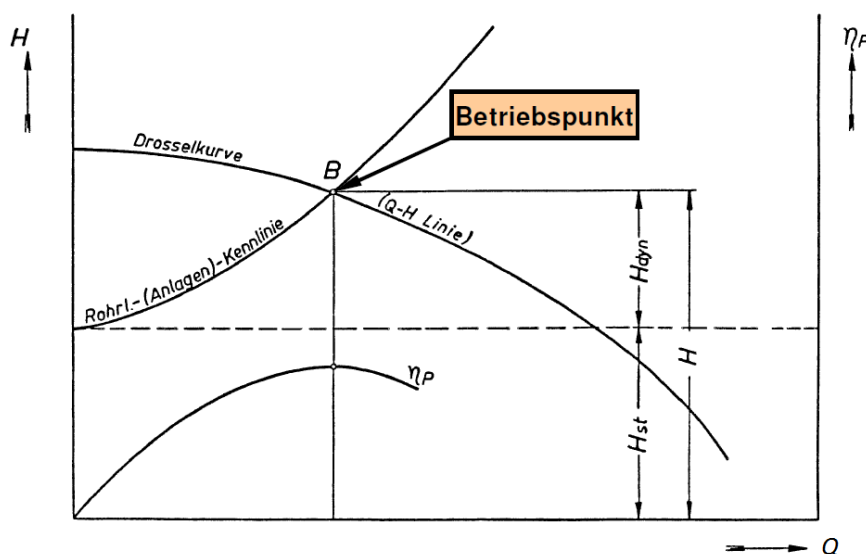


Abbildung 3: Q-H-Diagramm: Betriebspunkt als Schnittpunkt von Anlagen- und Pumpenkennlinie, hier „Drosselkurve“ genannt (Neumaier 1994)

Durch die Einführung von Betriebsweisen, die den Pumpenwirkungsgrad für das gesamte Lastprofil optimieren, kann die Energieeffizienz verbessert werden. Dies kann z.B. durch den Einsatz mehrerer Pumpen geschehen, auf die der Förderstrom aufgeteilt wird. Diese können bei Bedarf zu- oder abgeschaltet werden. Des Weiteren können die Pumpen mit einem Frequenzumrichter (FU) ausgestattet werden, die einen drehzahlgeregelten Betrieb erlauben. Durch die Drehzahlregelung ist trotz schwankender hydraulischer Bedingungen ein bedarfsabhängiger Betrieb möglich, bei dem in gewissen Grenzen nur geringe Wirkungsgradverluste entstehen. Da zum Betrieb des FU zusätzliche elektrische Energie benötigt wird, sinkt der Wirkungsgrad im Wirkungsgradoptimum im Vergleich zum nicht-drehzahlgeregelten Betrieb um bis zu 5 % (DVGW-Information W Nr.77, S. 65).

Dynamische Steuerung der Pumpen

Um den Wirkungsgrad mit Hilfe einer dynamischen Steuerung durch Drehzahlregelung sowie durch Zu- und Abschalten der Pumpen zu optimieren, ist eine möglichst genaue Kenntnis der Bedarfssituation nötig. Eine an die Bedarfssituation angepasste dynamische Pumpensteuerung ermöglicht einen effizienten Pumpenbetrieb (DVGW-Information W Nr.77, S. 64-65). Hähnlein (2008) merkt an, dass die Möglichkeit der Nutzung hydraulischer Simulationsmodelle zur Optimierung des täglichen Betriebs „im Rahmen der Betriebs- bzw. Steuerungsoptimierung (Kurzzeitoptimierung) von Pumpen sowie der Bewirtschaftung der Behälter immer noch eine untergeordnete Rolle“ spielen. Dabei sei die „Entwicklung von hydraulischen Simulationsmodellen, die der Abbildung des hydraulischen Verhaltens vermaschter und verästelter Netze dienen“ weit fortgeschritten und „somit für Langzeitoptimierungsprobleme einsetzbar“ (Hähnlein 2008, S. 5). So seien durch die Betriebsoptimierung im von ihm betrachteten Netz Energieeinsparungen von 15 bis 22 % möglich (Hähnlein 2008, S. 204).

Pumpen richtig dimensionieren

Grundvoraussetzung für den Betrieb der Pumpen in optimalen Wirkungsgradbereichen ist die richtige Dimensionierung der Pumpen. Die Dimensionierung wird durch die Förderhöhe und den Förderstrom vorgegeben, die zur Versorgung der anschließenden Druckzone nötig ist. In der Praxis werden Pumpen oftmals überdimensioniert. Sicherheitszuschläge sind bei der Pumpendimensionierung aus Gründen der Energieeffizienz jedoch zu vermeiden. Durch die Überdimensionierung wird die Pumpe zumeist nicht im Betriebsoptimum betrieben, sodass das Effizienzpotenzial der Pumpe nicht ausgeschöpft werden kann (DVGW-Information W Nr.77, S. 77). Bei Schwankungen der Bedarfssituation ermöglicht die dynamische Pumpensteuerung einen effizienten und sicheren Betrieb.

Druckverluste

In Abhängigkeit von Fließgeschwindigkeit, der Rohrrauheit und dem Einbau von Einzelwiderständen steigt der Druckverlust bei der Förderung des Wassers durch das Rohrnetz. Steigende Druckverluste werden durch eine höhere Leistungsaufnahme der Pumpen ausgeglichen.

Werden die Druckverluste reduziert, sinkt demnach der Energiebedarf der Pumpen. Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der Druckverlusthöhe in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit. Wie in Formel 2.5 ersichtlich, erhöht sich der Druckverlust mit steigender Fließgeschwindigkeit im Quadrat.

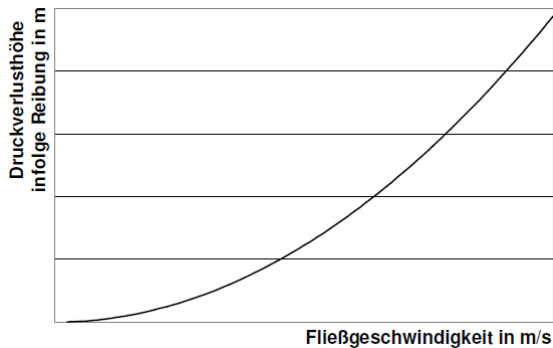


Abbildung 4: Druckverlusthöhe in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit (DVGW-Information W Nr.77, S. 92)

Aus energetischen Gesichtspunkten ist es nicht möglich, Idealwerte für die Fließgeschwindigkeit anzugeben. Anhand von Abbildung 4 wird deutlich, dass aus energetischer Sicht eine möglichst niedrige Fließgeschwindigkeit anzustreben ist. Dabei darf der in DVGW W 400-1 A aufgeführte Richtwert von 0,005 m/s aus hygienischen Gründen nicht unterschritten werden. Neben der Fließgeschwindigkeit hat das Rohrmaterial und der damit einhergehende Widerstandsbeiwert λ der Rohrwand einen Einfluss auf die Druckverluste. Mit der Zeit bilden sich Ablagerungen an den Rohrwänden, die den Widerstandsbeiwert und damit die Druckverluste erhöhen. Weiterhin kann es zu Querschnittsverengungen kommen, die wiederum die Fließgeschwindigkeit erhöhen. Des Weiteren steigern Einzelwiderstände wie z.B. Krümmer, Kniestücke, Abzweige und Armaturen innerhalb der Rohrleitung den Druckverlust in der Rohrleitung. Deshalb sollten nur zwingend erforderliche Armaturen in Rohrleitungen verbaut werden. Bei dem Einbau von Wasserzählern sind magnetisch-induktive oder Ultraschall-Durchflussmesser zu bevorzugen (DVGW-Information W Nr.77, S. 88-91). Die Vorteile dieser Wasserzähler sind ein freier Rohrdurchgang und das Fehlen mechanisch bewegter Teile. Dadurch unterbleiben Druckverluste und Verschleiß (Mutschmann und Stimmelmayer 2007, S. 419-420).

2.2. STANET

Zur Berechnung der hydraulischen Verhältnisse des von den Sanierungsmaßnahmen betroffenen Netzes wird das Netzberechnungsprogramm und -informationssystem STANET von *Fischer-Uhrig* verwendet. Mit dem Programm lassen sich Simulationen von Gas-, Wasser-, Fernwärme, Strom- und Abwassernetzen durchführen. Die hydraulischen Berechnungen erfolgen auf Grundlage der DVGW-Regelwerke. In der programmeigenen Datenbank werden alle eingetragenen hydraulischen Fachdaten (wie Leitungslänge, Querschnitt, Rohrreibung etc.) und importierten Netzinformationen (wie Hintergrundkarten, Verlegetiefen, Gebäudefirsthöhen etc.) gespeichert. Diese dienen als Grundlage für die durchgeführten Simulationen. STANET verfügt über eine Vielzahl von Funktionen, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird. Im Verlauf dieses Unterkapitels werden nur die im Kontext zur Fragestellung grundlegenden Hintergründe beschrieben.

Zunächst werden die hydraulischen Zusammenhänge, auf denen die Berechnungsoperationen beruhen, dargestellt. Da die Netzkalibrierung Voraussetzung dafür ist, „die tatsächlichen Verhältnisse [Strömungsverhältnisse; D. M.] zutreffend abbilden zu können“ (Hähnlein und Strutz 2010, S. 10), wird die Netzkalibrierung als Abschluss dieses Unterkapitels thematisiert.

2.2.1. Hydraulische Berechnungen

Im Berechnungsmodus „Hydraulik“, der zur Berechnung von Wassernetzen verwendet wird, können Drücke, Durchflüsse sowie Zu- und Abflüsse ermittelt werden. Daraus werden Größen, wie z.B. Fließgeschwindigkeit und Druckverlust abgeleitet. Die Simulationen basieren auf den Vorgaben der DVGW-Regelwerke (Ingenieurbüro Fischer-Uhrig 2015).

Durch die Verwendung von Profilen können unterschiedliche Lastfälle simuliert werden. Die Profile spiegeln den Verbrauch der Abnehmer wieder und werden im Vorfeld erstellt. Als Grundlage können die Wasserbedarfskennzahlen der DVGW W 410 herangezogen werden. Es empfiehlt sich jedoch, eigene Verbrauchsanalysen durchzuführen, um die Simulationen auf einer möglichst genauen Grundlage durchzuführen. Die Profile geben durch den Verbrauch der Abnehmer vor, welcher Förderstrom dem Netz zugeführt wird. Zuflüsse werden über sogenannte „Druckknoten“ in das Netz eingespeist.

Eine Simulation beginnt mit den Vorgaben zum Förderstrom Q und der anstehenden Druckhöhe H an den Druckknoten. Das Wasser strömt entlang des Druckgefälles zum Ort geringeren Drucks. Die dabei über die Länge der Rohrleitungen auftretenden Druckverluste h_v nach Formel 2.5 bestimmen die am Ende der Rohrleitung anliegende Druckhöhe H nach Formel 2.4. Besteht das Netz nur aus dieser einen Rohrleitung, sind die Fließ- und Druckverhältnisse damit abgebildet.

Die Netze der Wasserversorgung bestehen dagegen aus vermaschten und verästelten Haupt- sowie Versorgungsleitungen. Um die Fließ- und Druckverhältnisse dort abzubilden, wird die oben genannte Rechnung weitergeführt.

Dabei werden die Berechnungen solange iterativ durchgeführt, bis an jedem Knoten die Summe aller Zu- und Abflüsse sowie für jede Masche die Summe der Druckverluste „mit hinreichender Genauigkeit Null ist“ (DVGW GW 303-1, S. 10). Diese Bedingungen sind in den Kirchhoffschen Gesetzen für vermaschte Rohrnetze festgelegt:

$$\begin{array}{ll} \text{Erstes Kirchhoffsches Gesetz} & \sum Q_i = 0 \\ \text{(Knotenbedingung)} & \end{array} \quad (2.9)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Zweites Kirchhoffsches Gesetz} & \sum \Delta p_i = 0 \\ \text{(Maschenbedingung)} & \end{array} \quad (2.10)$$

2.2.2. Netzkalibrierung

„Die Durchführung eines Messprogramms ermöglicht eine Überprüfung und Korrektur der Modellnetzannahmen“ (Hähnlein und Strutz 2010, S. 10). Für die Rohrrauheit k beispielsweise werden zunächst Annahmen getroffen. Ablagerungen in den Rohren können die Strömung jedoch beeinflussen (siehe Kapitel 2.1.5). Um diese Einflussfaktoren besser abbilden zu können, werden Netzkalibrierungen vorgenommen.

Zunächst erfolgen Messungen im realen Netz. In einem Netzabschnitt wird unter definierten Bedingungen ein Druckabfall durch eine künstliche Abnahme mit gleichzeitiger Durchflussmessung erzeugt. Diese werden in der Regel nachts durchgeführt, da dort die Abnahme gering und somit der Einfluss anderer Verbraucher gering ist. Während der Messung wird an umliegenden Messstellen der Druckabfall gemessen. Im Rechnernetzmodell wird dieses Vorgehen unter den gleichen Bedingungen wiederholt und der simulierte Druckabfall mit dem realen verglichen. Durch Anpassung der Rauheit k der betroffenen Rohrleitungen wird der simulierte Druckabfall so beeinflusst, dass er sich dem gemessenen annähert. Dieses Vorgehen wird mit einer bestimmten Messstellendichte im gesamten Netz durchgeführt (Hähnlein und Strutz 2010; DVGW GW 303-1).

Das Arbeitsblatt DVGW GW 303-1 enthält Richtlinien zur Durchführung der Kalibrierung. Eine Kalibrierung gilt als ausreichend genau, wenn sich die Ruhedrucke von Simulation und Messung an den jeweiligen Messpunkten um nicht mehr als 2 %, maximal jedoch um 0,2 bar unterscheiden (DVGW GW 303-1, S. 16).

2.3. Darmstädter Wasserversorgung und ALT-Zustand

Die Wasserversorgung der Stadt Darmstadt ist durch Konzessionsverträge mit dem WVU *ENTEKA* geregelt. Das WVU ist Eigentümer des Netzes, hält dieses instand und übernimmt die Kundenversorgung. Der Konzern der *ENTEKA AG* hieß bis August 2015 *HSE AG*. Die *Hessenwasser* liefert mit den Wasserwerken in Pfungstadt und Eschollbrücken das in Darmstadt gebrauchte Trinkwasser. Mit dem Betrieb der Hochbehälter (HBs) und DEAs wurde die *Hessenwasser* durch die *ENTEKA* beauftragt. In einem Wasserlieferungsvertrag zwischen *Hessenwasser* und *ENTEKA* ist die Bereitstellung von Wasserdruck und -menge festgelegt. Es wird über mehrere Transportleitungen nach Darmstadt und in seine Nachbargemeinden gefördert. In Darmstadt wird es in die Niederzone (NZ) eingespeist.

In Abbildung 5 wird die Zonenaufteilung der Darmstädter Wasserversorgung im ALT-Zustand dargestellt. Der ALT-Zustand kennzeichnet den Netzzustand, wie er vor der Inbetriebnahme der DEA an der Oetinger Villa (DEA OETI) im November 2013 vorlag. Seit der Inbetriebnahme der DEA OETI erfolgen stückweise Anpassungen im Netz. Mit dem Abschluss dieser Anpassungsmaßnahmen befindet sich das Netz im SOLL-Zustand. Der temporäre Zustand zwischen ALT und SOLL wird in dieser Arbeit als Übergangszustand bezeichnet.

Die NZ versorgt den größten Teil der Darmstädter Wasserkunden und wird nach Osten hin durch das ansteigende Terrain begrenzt. Der druckbestimmende HB steht auf dem Oberfeld (HB OBER). Zur Versorgung der NZ reicht der von den Wasserwerken gelieferte Druck von ca. 184 m aus. Im östlichen Stadtgebiet ab einer geodätischen Höhe von ca. 150 m sorgen DEAs für die nötige Wasserdruckerhöhung, um auch die höher gelegenen Stadtteile zu versorgen. Die DEAs versorgen im Zusammenspiel mit Druckminderungsanlagen (DMAs) sieben HZs.

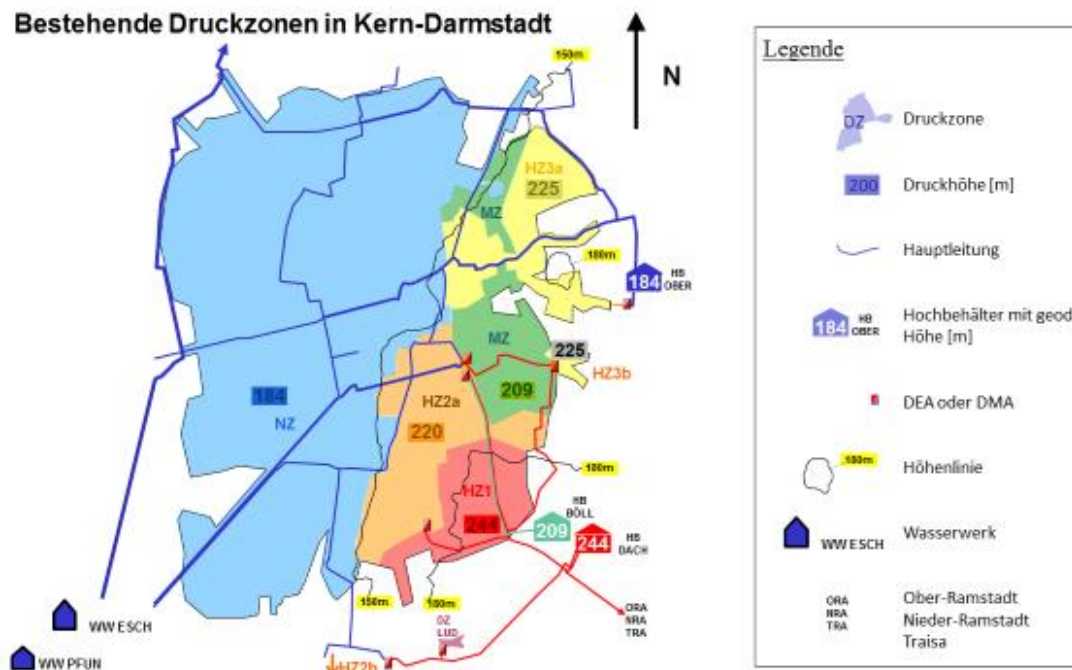


Abbildung 5: Darstellung der Druckzonen des ALT-Zustandes (nach Grüger 2015)

Im Folgenden wird das Versorgungssystem der HZs im ALT-Zustand genauer vorgestellt. Dabei werden für jede HZ die Zu- und Abflüsse durch DEAs sowie DMAs einzeln aufgeführt. Abschließend erfolgt die schematische Darstellung des ALT-Zustandes in einem Fließbild.

Hochzone 1

Die HZ1 fungiert als zentrale Verteilzone und sorgt über sechs DMAs für die Druckhaltung in vier der sechs anderen HZs. Sie befindet sich im südöstlichen Bereich von Darmstadt und versorgt den südlichen, hochgelegenen Teil des Paulusviertels. Der druckbestimmende HB befindet sich auf dem Dachsberg (HB DACH) und sorgt für eine Druckhöhe von 244 m. Südlich von Darmstadt befindet sich die DEA Marienhöhe (DEA MARI). Die DEA MARI fördert Wasser aus der NZ in die HZ1. In der Betriebsstätte Heinrichstraße sind zwei DEAs zur Versorgung zweier HZs untergebracht (DEA HEIN HZ1 sowie DEA HEIN MZ). Die DEA HEIN MZ ist für die Versorgung der alten Mittelzone (MZ_{ALT}) zuständig. Darauf wird später genauer eingegangen. Die DEA HEIN HZ1 speist zusammen mit der DEA MARI Wasser aus der NZ in die HZ1 ein. Die Pumpen beider DEAs sind nicht drehzahl geregelt und werden abwechselnd je nach Behälterwasserstand des HB DACH von der *Hessenwasser* zu- und abgeschaltet. Über eine Hauptleitung werden Nieder-Ramstadt, Ober-Ramstadt und Traisa mitversorgt. An der Ludwigshöhe schließt sich die DEA LUDW an, die den Bedarf der wenigen Abnehmer dort abdeckt. Auf die DEA LUDW und die von ihr versorgte Druckzone wird wegen ihrer geringen Bedeutung nicht weiter eingegangen. Die sechs DMAs, die über die HZ1 vier tiefer gelegene HZs versorgen, befinden sich in der Heinrichstraße, am Breslauer Platz, in der Klappacher Straße, in der Jahnstraße sowie in der Heinrich-Delp-Straße (DMAs HEIN HZ2a, HEIN HZ3a, BRES, KLAP, JAHN, HDEL).

In Tabelle 1 werden die von der HZ1 versorgten HZs, die sich dort einstellenden Druckhöhen und die DMAs, über die die Einspeisung erfolgt, aufgelistet.

Tabelle 1: Versorgung tiefer gelegener HZs durch die HZ1 über DMAs

Hochzone	Druckhöhe [m]	Versorgung über folgende DMAs
HZ 2a	225	HEIN HZ2a, KLAP, JAHN
HZ 2b	228	HDEL
HZ 3a	220	HEIN HZ 3a
HZ 3b	213	BRES

Hochzone 2a

Die HZ2a befindet sich sowohl geografisch als auch geodätisch zwischen HZ1 und NZ. Sie versorgt vornehmlich den nördlichen, tiefergelegenen Teil des Paulusviertels sowie Alt-Bessungen und einen Teil des Kapellplatzviertels. Die Druckhöhe von 225 m wird über die DMAs KLAP, HEIN HZ2a sowie JAHN gehalten, die sich jeweils im Grenzbereich zur hydraulisch höher gelegenen HZ1 befinden und Wasser aus der HZ1 in die HZ2a einspeisen.

Hochzone 2b

Die HZ2b versorgt einen Teil der Villenkolonie in Eberstadt. Der von der HZ2b versorgte, nordöstliche Teil der Villenkolonie befindet sich am Anstieg zur Marienhöhe. Die Zone grenzt wie die HZ2a an die HZ1 und wird durch die DMA HDEL über die HZ1 versorgt. Die Druckhöhe beträgt 228 m.

Alte Mittelzone

Die MZ_{ALT} liegt nördlich der HZ2a und versorgt hauptsächlich das Woogsviertel und Teile des Stadtgebiets „An den Lichtwiesen“. In nördliche Richtung verläuft die MZ_{ALT} weiterhin über die tiefergelegenen Bereiche der Mathildenhöhe bis in das östliche Martinsviertel und Teile des Ziegelbuschs. Der druckbestimmende HB befindet sich am Böllenfalltor und sorgt für eine Druckhöhe von 209 m. Die DEA HEIN MZ speist Wasser aus der NZ in die MZ_{ALT} ein. Die Pumpen der DEA sind nicht drehzahl geregelt und werden je nach Behälterwasserstand des HB BÖLL von der *Hessenwasser* geschaltet.

Hochzone 3a

Die HZ3a liegt im Nordosten Darmstadts. Sie grenzt an die MZ_{ALT} und versorgt die höher gelegenen Gebiete der Mathildenhöhe und des Stadtteils „Am Oberfeld“. Die Druckhöhe von 220 m wird von mehreren Anlagen aufrechterhalten. Die DMA HEIN HZ3a speist Wasser von der HZ1 aus ein.

In der Betriebsstätte des HB OBER fördert die DEA Oberfeld (DEA OBER) aus dem HB OBER in die HZ3a. Die DEA OBER wird automatisch zugeschaltet, wenn ein bestimmter Druck an einem bestimmten Punkt in der HZ3a unterschritten wird. Auf der Mathildenhöhe klimatisierte im ALT-Zustand eine Wärmepumpe die Räumlichkeiten der dortigen Ausstellungshallen. In eingeschaltetem Zustand förderte die Wärmepumpe Wasser aus der NZ in die HZ3a. Die wärmegeführte Betriebssteuerung oblag der Stadt Darmstadt. Die Pumpe wurde je nach den klimatischen Bedingungen in den Ausstellungshallen betrieben. Die Wärmepumpe wird im Folgenden mit DEA MATH bezeichnet. Da die Kontrolle über die DEA MATH nicht dem Wasserversorger oblag, wurde das Überströmventil Heinheimer-Straße (ÜSV HEIH) in die HZ3a integriert, um die Zone vor zu hohen Netzdrücken zu schützen. Bei Überschreitung eines gewissen Drucks entlässt das ÜSV HEIH Wasser aus der HZ3a in die NZ und sorgt damit für eine Druckbegrenzung im Netz.

Hochzone 3b

Die HZ3b umfasst ein Gebiet östlich der MZ_{ALT}. Sie versorgt die Abnehmer rund um das Gebiet des Botanischen Gartens und des Vivariums. Die Druckhöhe liegt auf 213 m. Die Zone wird durch die DMA BRES aus der HZ1 versorgt.

Fließbild ALT-Zustand

Abbildung 6 zeigt den oben beschriebenen ALT-Zustand als Fließbild. Zu sehen sind sämtliche HZs und deren Druckhöhe sowie DEAs, DMAs, HBs und das ÜSV HEIH.

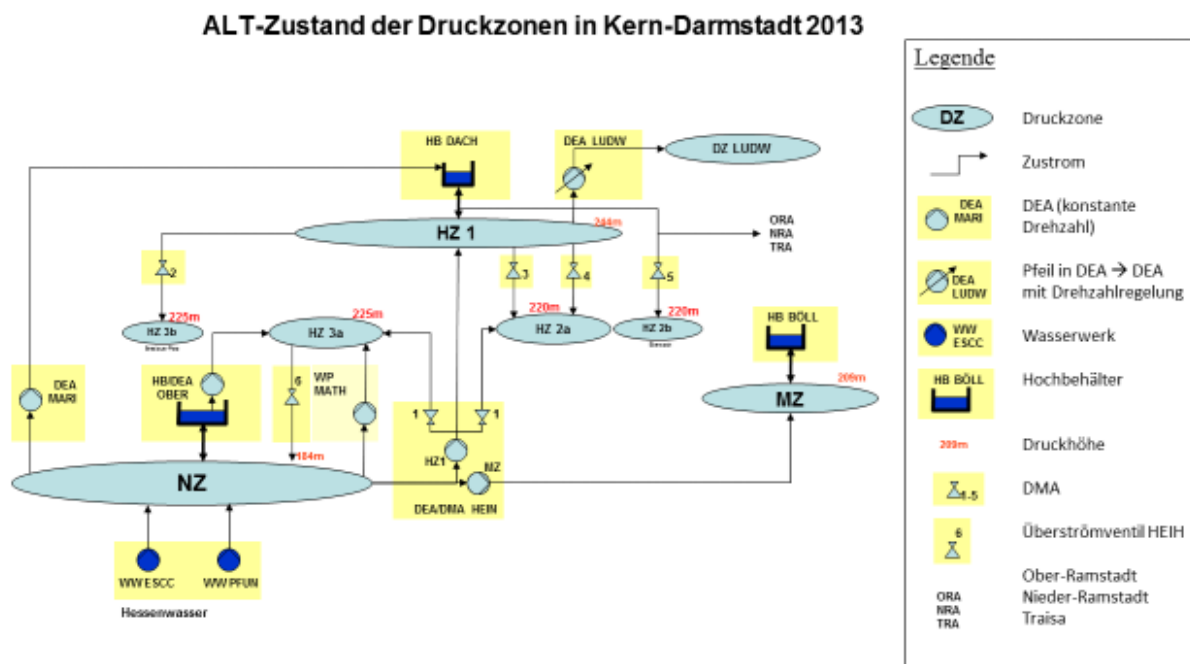


Abbildung 6: Fließbild des Druckzonenkonzepts des ALT-Zustandes mit den DMAs: HEIN HZ2a + HEIN HZ3a (1), BRES (2), JAHN (3), KLAP (4), HDEL (5); sowie dem ÜSV HEIH (6) (nach Grüger 2015)

2.4. SOLL-Zustand

In diesem Unterkapitel werden die Veränderungen anhand der einzelnen HZs erklärt und die Verbesserungen im Vergleich zum ALT-Zustand vorgestellt.

Zusammen mit der Ingenieurgesellschaft *Unger Ingenieure* wurde herausgefunden, dass das Netz des ALT-Zustandes ein ungenutztes Effizienzpotenzial besitzt. Fünf der sieben HZs weisen eine ähnliche Druckhöhe auf. Die Zusammenlegung dieser Zonen zu einer neuen Mittelzone (MZ_{SOLL}) soll zu Netzvereinfachungen und einem effizienteren Netzbetrieb führen. Weiterhin sollen Kosten für Erneuerungsmaßnahmen an Leitungen eingespart werden, die durch die Zonenzusammenlegung entfallen können (*ENTEKA* 2015). Diese Zusammenlegung und die damit verbundene Effizienzerhöhung werden durch den SOLL-Zustand beschrieben.

In Abbildung 7 wird die Zonenaufteilung der Darmstädter Wasserversorgung im SOLL-Zustand dargestellt. Die Zusammenlegung betrifft die HZ2a, HZ3a, HZ3b sowie die MZ_{ALT} . Weiterhin besteht in Zukunft die Möglichkeit die HZ2b in Eberstadt in die MZ_{SOLL} zu integrieren. Die HZ1 bleibt in ihrer alten Form bestehen. Sie bleibt von der MZ_{SOLL} getrennt, da die Druckhöhe der HZ1 die der MZ_{SOLL} deutlich übersteigt. Die meisten DEAs werden erneuert und mit FUs ausgestattet, welche über Drehzahlregelung eine bedarfsorientierte Netzdrucksteuerung ermöglichen. Von der LZH in Groß-Gerau-Dornheim können die Pumpen durch Veränderung des Solldrucks ferngesteuert werden. Die NZ bleibt nahezu unverändert. Allein das Studentenwohnheim zwischen Oettinger Villa und Alfred-Messel-Weg (in dieser Arbeit „Studentenwohnheim Karlshof“ genannt) wird aus der Versorgung der NZ ausgegliedert und an die MZ_{SOLL} angeschlossen.



Neue Mittelzone

Die MZ_{SOLL} wird keinen druckbestimmenden HB besitzen. Dafür werden die DEAs OETI und HEIN mit FUs und einer Nachdruckregelung mit Druckmessung ausgestattet, die im Zusammenspiel eine druckgeregelte Versorgung der MZ_{SOLL} ermöglichen. Das Prinzip der druckgeregelten Versorgung wird im Folgenden kurz erklärt. Sinkt z.B. die Abnahme im Netz, sinkt auch der Förderstrom der Pumpen. Dadurch verlagert sich der Betriebspunkt entlang der Pumpenkennlinie im Q-H-Diagramm (siehe Abbildung 3) nach oben. Die Förderhöhe der Pumpen steigt damit an. Die steigende Förderhöhe wird in den DEAs durch Drucksensoren registriert. Über die FUs wird die Drehzahl der Pumpen reduziert.

Dadurch wird die Pumpenkennlinie im Q-H-Diagramm nach unten verschoben. Bei festgelegter Zielförderhöhe stellt sich somit der zur Druckhaltung benötigte Förderstrom ein. Sind die Möglichkeiten der Druckhaltung durch Drehzahlregelung erschöpft, werden Pumpen bei Bedarf automatisch zu- oder abgeschaltet.

Die DEA HEIN und OETI werden über die „Ost- und Westspange“ miteinander verbunden (siehe Abbildung 7). Die Ost- und Westspange sind zwei Hauptleitungen, die die Versorgungssicherheit der MZ_{SOLL} verbessern sollen. Bei einem Ausfall der DEAs OETI oder HEIN ist die verbleibende DEA durch die West- und Ostspange in der Lage, das vom Ausfall betroffene Gebiet der MZ_{SOLL} mitzuversorgen. Zur Erstellung der Ostspange sind lediglich Umschaltmaßnahmen der vorhandenen Rohrleitungen vorzunehmen. Die Erstellung der Westspange erfordert die Neuverlegung von ca. 1.300 m Leitung mit einem Nenndurchmesser von 400 mm (DN 400) von der geplanten DEA HEIN entlang der Wienerstraße, Roßdörfer Straße, Teichhausstraße und Pützerstraße. An der Kreuzung der Dieburger Str., an der die Pützerstr. in die Heinheimer Str. übergeht, schließt die zu verlegende Leitung an eine bestehende DN 400 Leitung an. Von dort bis zur DEA OETI sind weitere Umschaltmaßnahmen erforderlich. Im Zuge der Umschaltmaßnahmen wird das Gebiet rund um das Studentenwohnheim Karlshof in der Nähe der Oetinger Villa an die MZ_{SOLL} angeschlossen. Dieses Studentenwohnheim verfügte bisher über eine eigene DEA, die nach der Umschaltung entfällt. Die Umschaltung sorgt jährlich für eine um 62.000 m³ höhere Abnahme in der MZ_{SOLL} .

Die DMA KLAP an der Schnittstelle zur HZ1 bleibt erhalten, um die MZ_{SOLL} bei Bedarf (z.B. Brandfall) kurzfristig von Süden her mit zusätzlichen Wassermengen zu versorgen.

Neben dem Bau der West- und Ostspange sowie dem Erhalt der DMA KLAP ist zur Verbesserung der Versorgungssicherheit eine Netzersatzanlage (NEA) vorgesehen. Die NEA ist ein mit Diesel betriebenes Notstromaggregat und wird in der Betriebsstätte Heinrichstraße platziert. Bei einem Stromausfall kann die NEA die Stromversorgung der DEA HEIN sicherstellen.

Hochzone 2b

Es gibt Überlegungen die HZ2b an die MZ_{SOLL} anzuschließen. Die HZ2b versorgt einen kleinen Teil im Norden Eberstadts und ist damit räumlich von der MZ_{SOLL} getrennt. Es ist denkbar, die HZ2b über eine bestehende Versorgungsleitung an die MZ_{SOLL} im Bereich der HZ2a anzuschließen. Die Versorgungsleitung führt über das Gelände der ehemaligen Cambrai-Fritsch-Kaserne und ist Bestandteil der HZ1. Es ist davon auszugehen, dass die Leitung durch Inkrustationen eine erhöhte Rauheit besitzt, die zu hohen Druckverlusten führt. Im Zuge einer Erneuerung dieser Leitung könnte die HZ2b an die MZ_{SOLL} angeschlossen werden. Diese Überlegung wird in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Durch die neue Struktur der HZs muss ein großer Teil des Trinkwassers nicht mehr bis auf die Höhe des HB DACH gehoben, um anschließend über die DMAs wieder in tiefer gelegene Gebiete eingespeist zu werden. Die neuen, druckgeregelten DEAs werden lediglich die im Netz erforderliche Förderhöhe aufbringen und dadurch im Vergleich zum ALT-Zustand elektrische Pumpenergie und damit Kosten einsparen. Die Erneuerung der Pumpen soll außerdem den Wirkungsgrad der DEAs verbessern. Des Weiteren wird vermutet, dass durch das ÜSV HEIH ein bedeutender Anteil des von der DEA MATH unter dem Verbrauch von elektrischer Energie aus der NZ in die HZ3a geförderten Wassers direkt wieder in die NZ ausgespeist wird. Durch die drehzahlgeregelten DEAs und die Stilllegung des ÜSV HEIH soll die Netzdruckregelung effizienter gestaltet werden.

Durch die Umstellung des ALT- auf den SOLL-Zustand und der damit einhergehenden Reduktion der HZs von sieben auf vier Zonen sollen sich außerdem betriebliche Vereinfachungen ergeben.

2.5. Mögliche Sanierung und Integration der DEA MATH

In diesem Unterkapitel wird auf die mögliche Sanierung der DEA MATH eingegangen. Über die Umsetzung dieser Teilmaßnahme wurde bislang noch nicht entschieden. Die wesentlichen Entscheidungskriterien werden Versorgungssicherheit und Energieeffizienz sein.

Im Zuge der Umbaumaßnahmen soll die DEA MATH, die derzeit als Wärmepumpe der Ausstellungshallen fungiert, stillgelegt werden. Innerhalb der Planungen des SOLL-Zustandes werden Überlegungen angestellt, die DEA MATH ebenfalls zu erneuern und dadurch einen zusätzlichen Einspeisepunkt für die MZ_{SOLL} zu schaffen. Dies soll zu höherer Versorgungssicherheit für den Fall führen, dass eine der beiden DEAs HEIN oder OETI ausfällt. Des Weiteren besteht der Gedanke, dass sich durch die Aufteilung der Förderströme auf einen dritten Einspeisepunkt die Druckverluste im gesamten Netz so verringern könnten, dass sich energetische Vorteile daraus ergeben. Die umgebaute DEA MATH soll für diesen Fall zwei Pumpen á 90 m³/h Förderleistung erhalten. Diese besitzen keine Drehzahlregelung, sodass sie im Betriebszustand jeweils immer 90 m³/h fördern. Durch die Einsparung des FU kann der Wirkungsgrad im Vergleich zu DEA OETI und HEIN um 1-3 % erhöht werden (ENTEGA 2015). Im angedachten Fall soll die wirkungsgradoptimierte DEA MATH für die Grundlast sorgen. Die drehzahlgeregelten Pumpen der DEAs OETI und HEIN fördern die restlichen benötigten Mengen als Spitzenlastanlagen. Das angedachte Lastmanagement wird beispielhaft in Abbildung 9 dargestellt. Bei Bedarf soll im Wechsel jeweils eine der beiden Pumpen der DEA MATH zur Versorgung der MZ_{SOLL} zugeschaltet werden. Für den Fall, dass es wirtschaftlich sein sollte, beide Pumpen gleichzeitig laufen zu lassen, wird die DEA MATH 180 m³/h in die MZ_{SOLL} fördern können.

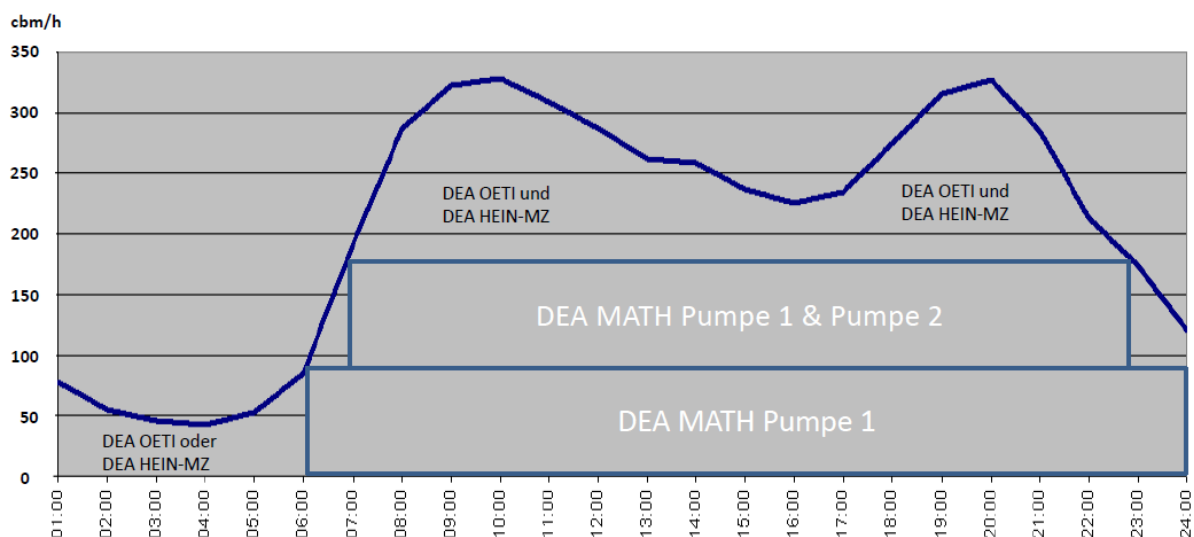


Abbildung 9: Mögliche Nutzung der DEA MATH mit zwei Pumpen á 90 m³/h, ohne FU (Grüger 2015)

3. Untersuchungsmethodik

In diesem Kapitel werden die Methoden vorgestellt, mit denen die Aufgabenstellung dieser Arbeit bearbeitet wird. Die Ziele der Arbeit sind, den elektrischen Energiebedarf des ALT-Zustandes und den des SOLL-Zustandes zu ermitteln, eine Investitionsrechnung zur Integration der DEA MATH durchzuführen sowie weiteres Optimierungspotenzial in der Versorgung der MZ_{SOLL} aufzudecken. Die Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs des ALT- und SOLL-Zustands bezieht sich in dieser Arbeit nur auf die HZs, die im Zuge der Sanierungsmaßnahmen zur MZ_{SOLL} zusammengelegt werden. Daraus folgt, dass bei der Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs des ALT-Zustands nur die HZs 2a, 3a und 3b sowie die MZ_{ALT} miteinbezogen werden. Konsequenter Weise entspricht der elektrische Energiebedarf im SOLL-Zustand dem elektrischen Energiebedarf der MZ_{SOLL} , die aus der Zusammenlegung der oben genannten HZs entsteht.

Bevor die eigentlichen Methoden vorgestellt werden, wird in Unterkapitel 3.1 auf die Datengrundlage eingegangen, auf deren Basis alle weiteren Berechnungen erfolgen. Im Laufe der Untersuchungen stellte sich heraus, dass eine vielschichtige und teilweise lückenhafte Datenlage vorliegt. Besonders im Bereich der Datenerfassungs- und Datenabfragesysteme der *ENTEKA* und *Hessenwasser* sind Förder-, Druck- und Energiedaten nicht durchgängig für alle DEAs und DMAs vorhanden. Deshalb sind im späteren Verlauf der Arbeit Extrapolationen nötig, um Datenlücken auszugleichen. Um bereits vor der Vorstellung der eigentlichen Methoden einen Überblick über die Datenlage zu erlangen, werden im Unterkapitel 3.1 alle in der Arbeit verwendeten Daten aufgeführt.

Auf die Vorstellung der Datenlage folgt in Unterkapitel 3.2 die Vorstellung der Methoden zur Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs im ALT-Zustand. Über die von Strom- und Wasserzählern im Jahr 2013 ermittelten Energie- und Förderdaten der DEAs und DMAs wird dabei auf den elektrischen Energiebedarf geschlossen, der zur Versorgung der einzelnen HZs nötig ist. Abschließend erfolgt eine Plausibilitätsprüfung, da nicht bekannt ist, wann die Wasserzähler zuletzt geeicht wurden.

Daraufhin wird in Unterkapitel 3.3 die grundsätzliche Überlegung zur Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs im SOLL-Zustand vorgestellt. Diese basiert auf den im Grundlagenteil vorgestellten Formeln 2.1 und 2.2. Über die dort aufgeführten Variablen wird der elektrische Energiebedarf zur Versorgung der MZ_{SOLL} ermittelt. Die Methoden zur Bestimmung dieser Variablen werden in den darauffolgenden Unterkapiteln vorgestellt.

In Unterkapitel 3.4 wird die Methoden zur Erstellung eines ganzjährigen Lastprofils der MZ_{SOLL} vorgestellt. Über dieses wird für alle 8.760 Stunden im Jahr der zur Versorgung der MZ_{SOLL} benötigte Förderstrom Q ermittelt.

Das Lastprofil basiert auf den aufgezeichneten Stundenwerten ($t = 1 \text{ h}$) der in den DEAs und DMAs installierten Wasserzähler. Die Stundenwerte werden klassifiziert, sodass sich eine Verteilung der Förderströme für ein Jahr ergibt.

Ausgehend von den im Lastprofil erstellten Klassen werden über die in Unterkapitel 3.5 erläuterten Methoden die Gesamtwirkungsgrade η_G der DEAs bei den jeweiligen Förderströmen bestimmt. Die Gesamtwirkungsgrade ergeben sich aus den Daten der Leistungsmessung der DEA OETI und aus den Daten der Leistungsprüfungen, die vom Pumpenhersteller zur Verfügung gestellt werden.

In Unterkapitel 3.6 werden die Arbeitsschritte vorgestellt, über die die Förderhöhe H beeinflusst wird. Zur Ermittlung der Förderhöhe wird das Netzberechnungsprogramm STANET verwendet. Mit diesem Programm werden in einem vom WVU zur Verfügung gestelltem Rechnernetzmodell der Darmstädter HZs hydraulische Simulationen vorgenommen. Dabei werden die durch das Lastprofil vorgegebenen, klassifizierten Förderströme über die DEAs in die MZ_{SOLL} eingespeist und jeweils die notwendige Förderhöhe zur Netzdruckhaltung ermittelt. In diesem Unterkapitel werden die Grundlagen für die Simulationen geschaffen. Es werden die am Netz vorgenommenen Veränderungen vorgestellt. Die Veränderungen werden vorgenommen, um die hydraulischen Bedingungen der MZ_{SOLL} möglichst genau abzubilden. Als Beispiel werden hier die niederzonenseitigen Druckverluste während des Pumpenbetriebs genannt. Durch die Implementierung eines vorgeschalteten Rohrnetzes werden die nach einer Vordruckanalyse ermittelten, niederzonenseitig durch den Betrieb der Pumpen auftretenden Druckverluste berücksichtigt. Des Weiteren werden in diesem Unterkapitel Informationen zur Kalibrierung des Netzes gegeben. Die Kalibrierung gibt die Genauigkeit der Berechnungen vor.

In Unterkapitel 3.7 wird dargelegt, auf welche Weise mit Hilfe der Förderströme Q , Gesamtwirkungsgrade η_G sowie der Förderhöhen H der elektrische Energiebedarf der MZ_{SOLL} berechnet wird. Mit dem Netzberechnungsprogramm STANET werden die Förderhöhen H der DEAs für jeden Lastfall berechnet. Bei den Simulationen werden die Förderströme in unterschiedlichen Anteilen auf die DEAs aufgeteilt, um die Pumpensteuerung mit dem geringsten elektrischen Energiebedarf zu ermitteln.

In Unterkapitel 3.8 wird die Durchführung einer Investitionsrechnung zur möglichen Integration der DEA MATH erläutert. Um die jährliche Vermögensänderung, die das WVU durch die Integration der DEA MATH erfahren würde, zu ermitteln, wird die Annuitätenmethode angewendet.

In Unterkapitel 3.9 wird aufgezeigt, wie bei der Suche nach weiterem Optimierungspotenzial in der MZ_{SOLL} vorgegangen wird. Die Suche beschränkt sich dabei auf das Potenzial, das im vorgezogenen Austausch von Leitungen zur Reduktion von Druckverlusten liegt. Es wird überprüft, ob durch den vorgezogenen Austausch von Rohrleitungen Druckverluste soweit reduziert werden können, dass die eingesparte Pumpenergie die Investitionskosten des Rohrleitungsaustausches decken.

3.1. Datengrundlage und Datenqualität

Im folgenden Unterkapitel werden die zur Bearbeitung der Aufgabenstellung zu Grunde liegenden Daten und ihre Herkunft aufgeführt. Dabei werden zunächst die Datenerfassungs- und Datenabfragesysteme der *ENTEGA* und *Hessenwasser* erläutert sowie die Genauigkeit der verwendeten Druckmesser und Wasserzähler angegeben. Anschließend erfolgen Informationen zu den für diese Arbeit relevanten Kundenverbrauchsabrechnungen. Daraufhin werden Informationen zur hydraulischen Leistungsprüfung der neu einzubauenden Pumpen gegeben. Abschließend wird die im Dezember 2014 an der DEA OETI durchgeführte Leistungsmessung zur Ermittlung des Gesamtwirkungsgrades der neu eingebauten Pumpen vorgestellt.

3.1.1. Datenerfassung und Datenabfragesysteme der *ENTEGA* und *Hessenwasser*

Die Datenerfassung der relevanten Anlagen ist nicht standardisiert. Vielmehr liegt eine Vielfalt von Zählertypen, Datenabfragesystemen und Zuständigkeiten in der Betreuung vor. Es gibt drei zentrale Stellen, in denen die Messwerte der Strom- und Wasserzähler sowie der Druckmesser gespeichert und abgerufen werden können. Die Quer-Verbund-Leitstelle wird von der *ENTEGA* und die Leitzentrale *Hessenwasser* von der *Hessenwasser* betrieben. Dort werden die Daten sämtlicher DEAs, HBs und der DMA HEIN HZ2a+3a gespeichert. Die Daten der restlichen DMAs, die mit Wasserzähler und Funkübertragung ausgerüstet sind, werden über das GSM-Netz an den externen Dienstleister Sensus übertragen. Die Wasserzählerbetreuung wird teilweise von der *Hessenwasser* und teilweise von der *ENTEGA* übernommen (*ENTEGA 2015*). Es werden drei unterschiedliche Wasserzählertypen verwendet. In den DEAs und DMAs kommen Verbund- und Monozähler sowie Zähler mit magnetisch-induktiver Durchflussmessung zum Einsatz. Im Anhang auf S. XVI sind Zählerart, Datenabfragesystem und die Zuständigkeit der Zählerbetreuung für jede DMA und DEA aufgelistet.

Am Rande wird darauf verwiesen, dass im Konzern der *ENTEGA* Zähler mit magnetisch-induktiver Durchflussmessung als IDM-Zähler (induktive Durchflussmessung) bezeichnet werden, um eine Verwechslung mit MID-konformen Zählern zu vermeiden. MID-konforme Zähler sind Zähler, die die Anforderungen der Europäischen Richtlinie über Messgeräte (Measuring Instruments Directive – kurz MID) erfüllen. Die Kürzel IDM und MID stehen also in keinem Zusammenhang (*ENTEGA 2015*).

Datenerfassung an den DEAs, DMAs und HBs

Die DEAs MARI, HEIN HZ1, HEIN MZ sowie MATH sind mit Wasserzählern ausgerüstet. Die in einer Stunde geförderten Mengen werden als Stundenwerte an die QVL und LZH übertragen. Von dort können sie zur Auswertung abgerufen werden. Die DEA OBER besitzt keinen Wasserzähler. Dafür wird die Betriebsdauer der Pumpen stundenweise aufgezeichnet und übermittelt.

Die Aufzeichnung der Stundenwerte zum elektrischen Energiebedarf der Pumpen erfolgt seit Mitte Januar 2013 und kann bis zu diesem Zeitpunkt rückwirkend abgerufen werden. Für die DEA MATH liegen keine Stundenwerte zum elektrischen Energiebedarf vor.

Die Daten zu Vor- und Nachdrücken der DEAs liegen als Stundenwerte vor. Der Vordruck der DEA HEIN wird erst seit dem 23.05.2012 übermittelt. Für die DEA OBER sind Stundenwerte nur für den Nachdruck vorhanden.

Die DEA OETI fördert seit dem 19.11.2013 im täglichen Wechsel mit der DEA HEIN MZ in die MZ_{ALT}. Seit diesem Tag liegen die Stundenwerte zur Fördermenge, dem elektrischen Energiebedarf sowie Vor- und Nachdruck vor.

Für die DMAs KLAPP, JAHN, HEIN HZ1 HZ2a+3a sowie für das ÜSV HEIH sind die stündlichen Fördermengen stufenweise seit dem Sommer 2012 vorhanden. Die Fördermengen der DMA BRES werden messtechnisch nicht erfasst.

Weiterhin werden die Wasserstände der Darmstädter HBs als Stundenwerte erfasst. In Abbildung 10 sind die hier beschriebenen Zusammenhänge des Datenabfragesystems dargestellt. Es sind nur die Anlagen und Messeinrichtungen aufgeführt, die für diese Arbeit von Relevanz sind.

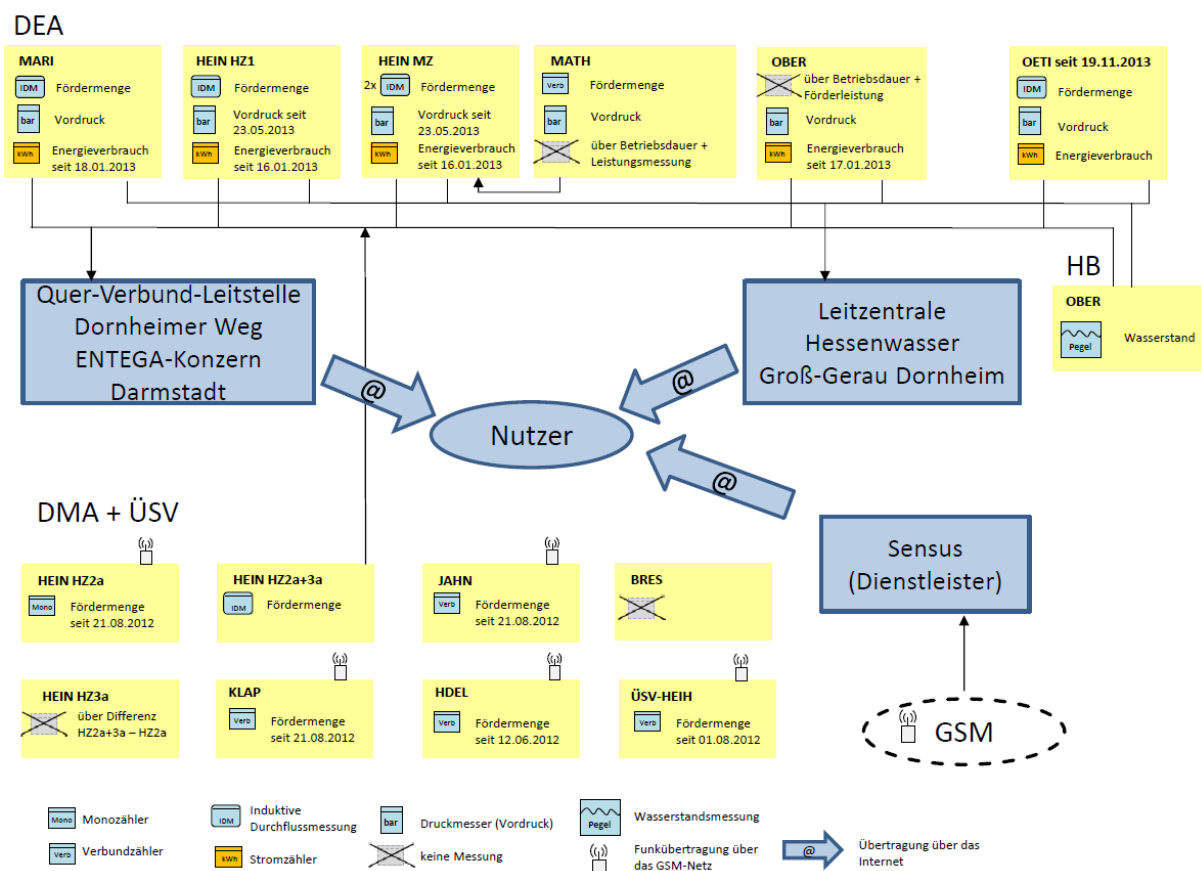


Abbildung 10: Darstellung der Datenabfragesysteme der relevanten Anlagen

Im späteren Verlauf werden die Stundenwerte verschiedener DEAs und DMAs miteinander verrechnet. Die Abfrage der Stundenwerte verläuft wie in Abbildung 10 erkennbar über drei verschiedene Abfragesysteme. Zunächst ist nicht eindeutig zu klären, ob die von den Zählern zu einem bestimmten Zeitpunkt gemessenen Stundenwerte in den verschiedenen Systemen jeweils den gleichen Stunden im System zugeordnet werden. Es besteht der Verdacht, dass die Datenreihen der verschiedenen Systeme gegeneinander „verschoben“ sind, insbesondere was den Umgang der Systeme mit den Umstellungen von Winter- auf Sommerzeit und umgekehrt betrifft. Einfachheitshalber soll hier vorweg genommen werden, dass sich der Verdacht nicht bestätigt und die Stundenwerte aller drei Systeme einander ohne weiteres gegenübergestellt werden können. Die Analyse dazu findet sich im Anhang ab S. XVII.

Genauigkeit der Wasserzähler und Druckmesser

Alle Wasserzähler sind mindestens 20 Jahre alt. Die IDM-Zähler der DEA HEIN MZ und DMA HZ1 HZ2a+3a wurden beispielsweise 1993 verbaut. Der IDM-Zähler der DEA HEIN HZ1 stammt aus dem Jahr 1976. Es ist nicht bekannt, wann die Zähler zuletzt kalibriert wurden (ENTEGA 2015). Die Genauigkeit der IDM-Zähler der DEA beträgt bei geeichten Zählern $\pm 0,5 \%$ des maximalen Volumenstroms (siehe Anhang S. XVIII). Für die verwendeten Verbund- und Monozähler sind keine Informationen über die Genauigkeit nach der Eichung verfügbar.

Des Weiteren kann nicht davon ausgegangen werden, dass die erforderlichen Einbaubedingungen zur Vergleichmäßigung des Strömungsprofils für die Zähler der DEAs und DMAs gegeben sind. Diese werden beispielsweise für die IDM- und Verbundzähler der DEA HEIN HZ1 sowie DMA HEIN HZ2a+3a als auch DMA HEIN HZ2a nicht eingehalten (siehe Anhang S. XVIII). Aus diesen Gründen müssen alle Ergebnisse der Durchflussmessungen zunächst in Zweifel gezogen werden.

Die Druckmesser der DEA HEIN HZ1 und MZ messen im Messbereich von 0-10 bar mit einer Genauigkeit von 0,5 %. Das bedeutet, dass die Messungen bei geeichten Druckmessern auf 0,05 bar bzw. 0,5 m genau sind (Endress + Hauser). Das Datum der letzten Eichung ist nicht bekannt. Deshalb müssen die Ergebnisse dieser beiden Druckmesser in Zweifel gezogen werden. Der Druckmesser der neuen DEA OETI gehört zu einer neueren Modellreihe, wurde im Jahr 2013 eingebaut und misst mit einer Genauigkeit von 0,02 bar bzw. 0,2 m. (VEGA Grieshaber KG 2012). Es ist nicht bekannt, welcher Druckmesser in der DEA MATH verwendet wird. Es wird davon ausgegangen, dass das Modell der DEA HEIN auch dort verbaut wurde (ENTEGA 2015).

3.1.2. Kundenverbrauchsabrechnung der HZs 2012

Neben den von den Wasserzählern der DEAs und DMAs gemessenen Fördermengen liegen für das Jahr 2012 die Wassermengen der HZs aus den Kundenverbrauchsabrechnungen vor. Diese Wassermengen entstammen den Messwerten der beim Kunden angebrachten Wasserzähler.

Die von den Kundenwasserzählern gemessenen Mengen zuzüglich der Wasserverluste ergeben die von den DEAs in das Netz geförderte Wassermenge. Zu den Verlusten zählen tatsächliche Wasserverluste im Netz (ausgelöst durch Undichtigkeiten, Rohrbrüche etc.) sowie scheinbare Wasserverluste (ausgelöst durch Messungenauigkeiten, Abgrenzungsverluste etc.) (DVGW W 392, S. 16). Die Wasserverluste werden von der *ENTEKA* auf Erfahrungswerten basierend mit 3 % angesetzt (Grüger 2015).

3.1.3. Kundenverbrauchsabrechnungen umliegender Gemeinden 2012 und 2013

Weiterhin liegen für im Umland von Darmstadt angesiedelte Gemeinden die verbrauchten Wassermengen aus den Kundenabrechnungen für die Jahre 2012 und 2013 vor. Die Kundenabrechnungen beziehen sich auf die verbrauchten Wassermengen von Haushalten und Kleingewerbe der Gemeinden Erzhausen, Weiterstadt, Biebesheim, Riedstadt und Stockstadt.

3.1.4. Leistungsprüfung

Es liegen Leistungsprüfungen vom Pumpenhersteller für die bei den anstehenden Baumaßnahmen der DEAs OETI, HEIN sowie MATH zu erneuernden Pumpen vor. Die hydraulischen Leistungsprüfungen werden nach EN ISO 9906 durchgeführt. Die Ergebnisse werden als hydraulische Kennlinien ausgegeben und sind im Anhang ab S. XX einsehbar.

In Abhängigkeit der Fördermenge werden Förderhöhe, Pumpenwirkungsgrad, NPSH-Wert, sowie Wellenleistung und Leistungsaufnahme der Pumpen dargestellt. Die drehzahlregelten Pumpen der DEAs HEIN und OETI sind auf einen Förderstrom von 90 m³/h bei einer Förderhöhe von 41,5 m ausgelegt. Zusätzlich befinden sich in Tabelle 18 im Anhang auf S. XXVII einige vom Hersteller gesondert vorgelegte Ergebnisse der Leistungsprüfungen. „Eta“ stellt dabei den Pumpenwirkungsgrad η_{pu} dar.

Die Pumpen der DEA MATH wurden bis dato noch nicht bestellt. Es liegen Leistungsdaten für mehrere Varianten einer Pumpenbaureihe vor. Falls die Sanierung der DEA MATH beschlossen werden sollte, kann die Pumpenkonfiguration also noch in Abhängigkeit der zu erwartenden Förderhöhe und Förderstroms ausgewählt werden. Im Anhang ab S. XXVIII werden die Kennlinien und Wirkungsgrade der potentiellen Pumpenkonfigurationen der DEA MATH vorgestellt. Des Weiteren wird dort ein Vorschlag zur Auswahl der Pumpenkonfiguration getroffen.

3.1.5. Leistungsmessung: Messung des Gesamtwirkungsgrades der DEA OETI

Am 09.12.2014 führten der Pumpenhersteller und die *ENTEKA* eine Leistungsmessung an der DEA OETI durch. Die DEA besteht aus vier Pumpen, welche je nach Fördermengenbedarf in Reihe geschaltet werden können.

Jede Pumpe ist auf eine Fördermenge von 90 m³/h bei einer Förderhöhe von 41,5 m ausgelegt. Es wurden Daten zu sechs Betriebspunkten erhoben. Dabei wurde der Förderstrom, die verbrauchte elektrische Energie sowie die Druckverhältnisse vor und nach den Pumpen gemessen. Aus den Daten wird auf die Förderhöhe, die benötigte hydraulische Energie und schließlich auf den Gesamtwirkungsgrad in jedem Betriebspunkt geschlossen. Die Ergebnisse der Leistungsmessung sind in Tabelle 19 im Anhang auf S. XXX einzusehen.

3.2. Elektrischer Energiebedarf ALT-Zustand

In diesem Unterkapitel wird der Weg zur Berechnung der zur Versorgung der HZs benötigten elektrischen Energie im ALT-Zustand erläutert. Grundlage sind die Messungen der Strom- und Wasserzähler der DEAs aus dem Jahr 2013. Da die Messreihen unvollständig sind, müssen einige Extrapolationen zur Vervollständigung der Datensätze vorgenommen werden. Zunächst werden die Berechnungswege vorgestellt, mit denen der Energiebedarf der einzelnen DEAs im Jahr 2013 ermittelt wird. Aus dem Energiebedarf der einzelnen DEAs wird darauffolgend der Energiebedarf zur Versorgung der einzelnen HZs ermittelt. Zuletzt werden die Förder- und Energiemengen 2013, die sich aus gemessenen und geschätzten Daten zusammensetzen, einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Eine Plausibilitätsprüfung wird in diesem Fall aus zwei Gründen durchgeführt. Es werden zum einem Extrapolationen vorgenommen, um die Messreihen zu vervollständigen. Zum anderem ist nicht bekannt, wann die Wasserzähler zuletzt geeicht wurden (siehe Unterkapitel 3.1.1)

Das Jahr 2013 wird aus folgenden Gründen als Referenzjahr des elektrischen Energiebedarfs im ALT-Zustand herangezogen. Für die meisten Pumpenanlagen werden seit Mitte Januar 2013 die stündlich verbrauchte Energie in kWh automatisch ausgelesen, an das Leitsystem der *Hessenwasser* übertragen und dort gespeichert. Das Jahr 2013 ist somit das erste Jahr, in dem der elektrische Energiebedarf der meisten relevanten DEAs fast vollständig vorliegt. Seit dem 19.11.2013 ist die DEA OETI in Betrieb und versorgt im Wechsel mit der DEA HEIN MZ die MZ_{ALT}. Seit diesem Zeitpunkt befindet sich das Netz im Übergangszustand.

3.2.1. Energiebedarf der Druckerhöhungsanlagen 2013

Die Grundlage zur Berechnung des Energiebedarfs jeder HZ ist die Bestimmung des Energiebedarfs jeder relevanten DEA. Wie oben erwähnt, sind die Aufzeichnungen des Energiebedarfs nicht durchgehend vorhanden. Im Folgenden wird für jede DEA die Vorgehensweise dargelegt, nach der die fehlenden Messwerte über Extrapolationen vervollständigt werden.

DEAs MARI, HEIN HZ1 und HEIN MZ

Für die DEAs MARI, HEIN HZ1 und HEIN MZ sind die stündlichen Energieverbräuche seit dem 18.01.2013 (DEA MARI) sowie 16.01.2013 (DEAs HEIN HZ1 + MZ) vorhanden. Um jeweils die Lücke zum 01.01.2013 schließen zu können, wird für jede DEA zuerst der spezifische Energiebedarf in kWh/m³ ermittelt. Der Berechnungsweg wird im Folgenden aufgeführt.

Aus den vorhandenen Stundenwerten zum Energiebedarf E_{el,h_i} und den dazugehörigen Fördermengen V_{h_i} wird für jede Betriebsstunde der DEAs ein Quotient e_{h_i} gebildet:

$$e_{h_i} = \frac{E_{el,h_i}}{V_{h_i}} \left[\frac{kWh}{m^3} \right] \quad (3.1)$$

Aus diesen über das Jahr berechneten Quotienten e_{h_i} wird für jede DEA über die Jahresstundenanzahl N ein Durchschnittsquotient gebildet, der dem spezifischen Energiebedarf e der jeweiligen DEA entspricht.

$$e = \frac{\sum e_{h_i}}{N} \left[\frac{kWh}{m^3} \right] \quad (3.2)$$

Der spezifische Energiebedarf e jeder DEA wird jeweils mit den Stundenwerten der Fördermengen V_{h_i} vom 01.01.2013 bis 16./18.01.2013 multipliziert. Auf diese Weise kann der fehlende stündliche Energiebedarf für den Zeitraum zu Beginn des Januars mit \hat{E}_{el,h_i} abgeschätzt und die Daten somit vervollständigt werden.

$$\hat{E}_{el,h_i} = e \cdot V_{h_i} [kWh] \quad (3.3)$$

Für jede der drei DEAs wird der geschätzte, stündliche Energiebedarf \hat{E}_{el,h_i} mit den restlichen Messwerten des stündlichen Energiebedarfs E_{el,h_i} über das Jahr hinweg zum Jahresenergiebedarf $E_{el,a}$ aufsummiert:

$$E_{el,a} = \sum E_{el,h_i} + \sum \hat{E}_{el,h_i} [kWh] \quad (3.4)$$

DEA OBER

Seit dem 17.01.2013 wird der Energiebedarf der DEA OBER aufgezeichnet. Weiterhin liegen Stundenwerte zur Betriebsdauer der DEA vor. Es liegen keine Stundenwerte zur geförderten Menge vor, da kein Wasserzähler vorhanden ist.

Zur Berechnung der fehlenden Messwerte des Energiebedarfs im Januar müssen zunächst die stündlichen Fördermengen V_{h_i} berechnet werden. Die Pumpen sind nicht drehzahl geregelt.

Daher kann über die stündliche Betriebsdauer T_{h_i} und der bekannten Förderleistung der Pumpen (je 34,5 m³/h) auf die stündliche Fördermenge V_{h_i} geschlossen werden:

$$V_{h_i} = T_{h_i} \cdot 34,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad [\text{m}^3] \quad (3.5)$$

Analog zur obigen Rechnung wird mit den errechneten geförderten Mengen und dem dazugehörigen Energiebedarf, der spezifische Energiebedarf, der Energiebedarf der nicht gemessenen Tage im Januar sowie der Jahresenergiebedarf ermittelt.

DEA MATH

Wie in Kapitel 3.1.1 erwähnt, wird der Energiebedarf der DEA MATH nicht aufgezeichnet. Dafür wird die Fördermenge von einem Wasserzähler gemessen und als Stundenwerte an die LZH übertragen. Über die gemessene Fördermenge wird durch die folgenden Berechnungsschritte auf den Jahresenergiebedarf geschlossen.

Die Pumpen sind nicht drehzahl geregelt und fördern im Betriebszustand 66 m³/h. Deshalb kann über die Stundenwerte der Fördermenge V_{h_i} auf die stündliche Betriebsdauer T_{h_i} geschlossen werden:

$$T_{h_i} = \frac{V_{h_i}}{66 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} \quad [\text{h}] \quad (3.6)$$

Am 22.05.2015 wurden Leistungsmessungen an beiden Pumpen durchgeführt. Pumpe 1 fördert mit einer Leistung von 17,1 kW in die HZ3a, Pumpe 2 mit 17,4 kW. Es ist immer nur eine Pumpe in Betrieb. Da nicht nachvollzogen werden kann, welche Pumpe zu welchem Zeitpunkt in Betrieb ist, wird aus den beiden Wirkleistungen der Durchschnitt berechnet und für alle weiteren Berechnungen verwendet. Über die Durchschnittsleistung von 17,25 kW und die stündliche Betriebsdauer T_{h_i} kann der stündliche Energiebedarf E_{el,h_i} berechnet werden:

$$E_{el,h_i} = T_{h_i} \cdot 17,3 \text{ kW} \quad [\text{kWh}] \quad (3.7)$$

Die Summe der Stundenwerte des Energiebedarfs E_{el,h_i} ergibt den Jahresenergiebedarf $E_{el,a}$ der DEA MATH:

$$E_{el,a} = \sum E_{el,h_i} \quad [\text{kWh}] \quad (3.8)$$

3.2.2. Energiebedarf zur Versorgung der Hochzonen

Die meisten DEAs versorgen gleichzeitig mehrere HZs. Die HZs 2a, 2b, 3a sowie 3b werden zudem über DMAs aus der HZ1 versorgt. Um den anteiligen Energiebedarf jeder HZ zu ermitteln, muss über die Fördermengen der DMAs der anteilige Energiebedarf der in den DEAs geförderten Wassermengen ermittelt werden.

HZ2a

Die DEAs HEIN HZ1 und MARI fördern Wasser aus der NZ in die HZ1 mit dem druckbestimmenden HB DACH. Die HZ2a wird ausschließlich über drei DMAs aus der HZ1 versorgt. Um den anteiligen Energiebedarf der HZ2a an der benötigten Pumpenergie der DEAs HEIN HZ1 und MARI zu ermitteln, muss zunächst der spezifische Energiebedarf für die Versorgung der HZ2a ermittelt werden. Dieser ergibt sich aus den spezifischen Energieverbräuchen der DEAs HEIN HZ1 und MARI. Die DEAs haben einen unterschiedlichen spezifischen Energiebedarf. Es kann nicht nachvollzogen werden kann, welche der beiden DEAs wie viel Wasser über die DMAs in die HZ2a fördert. Deshalb wird ein gewichtetes Mittel $e(HZ1)$ aus den beiden in Kapitel 3.2.1 vorgestellten Werten des spezifischen Energiebedarfs e gebildet. Die Gewichtung erfolgt über die Jahresfördermengen V_a der DEAs:

$$e(HZ1) = \frac{e(HEIN\ HZ1) \cdot V_a(HEIN\ HZ1) + e(MARI) \cdot V_a(MARI)}{V_a(HEIN\ HZ1) + V_a(MARI)} \left[\frac{kWh}{m^3} \right] \quad (3.9)$$

Um den Jahresenergiebedarf $E_{el,a}(HZ2a)$ der HZ2a zu berechnen, werden die von den DMAs eingespeisten Mengen V_a mit dem gemittelten spezifischen Energiebedarf $e(HZ1)$ der DEAs multipliziert:

$$E_{el,a}(HZ2a) = (V_a(KLAPP) + V_a(JAHN) + V_a(HEIN\ HZ2a)) * e(HZ1) \ [kWh] \quad (3.10)$$

HZ3a

Die HZ3a wird durch die DEAs OBER und MATH aus der NZ, sowie der DMA HEIN HZ3a aus der HZ1 versorgt. Das ÜSV HEIH begrenzt den Maximaldruck der HZ3a, indem Wasser bei Drucküberschreitungen in die NZ ausgespeist wird. Da die DEAs MATH und OBER nur in die HZ3a fördern, können die Jahresenergieverbräuche der beiden DEAs vollständig auf den Jahresenergiebedarf der HZ3a angerechnet werden. Der Energiebedarf der DEAs schließt den Energiebedarf des über das ÜSV HEIH in die NZ ausgespeisten, ungenutzten Wassers mit ein.

Die DMA HEIN HZ3a besitzt keinen eigenen Wasserzähler. Es sind allerdings zwei Zähler vorhanden, über die die in die HZ3a geförderten Mengen berechnet werden können. Ein Zähler misst die Fördermenge der DMA HEIN HZ2a.

Ein zweiter Zähler ist der DMA HEIN HZ2a und DMA HEIN HZ3a so vorgeschaltet, dass er den Volumenstrom misst, bevor er auf die beiden DMAs aufgeteilt wird. Die Differenz dieser Fördermengen bildet die Fördermenge der DMA HEIN HZ3a. Diese wird mit dem spezifischen Energiebedarf der Pumpen von HZ1 multipliziert und mit den Jahresenergieverbräuchen der DEAs OBER und MATH zum Jahresenergiebedarf 2013 der HZ3a aufsummiert.

HZ3b

Wie in Kapitel 3.1.1 erwähnt werden die Fördermengen der DMA BRES nicht messtechnisch erfasst. Die DMA versorgt die HZ3b zu 100 %, sodass das Fördervolumen der DMA dem Verbrauch der Endkunden zuzüglich der Wasserverluste entspricht. Um einen Näherungswert für die Fördermenge 2013 zu erhalten, wird der Wasserverbrauch 2012 der HZ3b angesetzt. Der Wasserverbrauch ist in STANET hinterlegt und wird aus den Kundenverbrauchsabrechnungen übernommen. Der Verbrauch dieser Zone beträgt weniger als 2 % der MZ_{SOLL} . Deshalb wird dieses Vorgehen als ausreichend genau eingestuft, um den anteiligen Energiebedarf der HZ3b zu bestimmen. Die Wasserverluste, die beim Transport durch das Netz bis hin zum Endkunden entstehen, werden mit dem Wasserverlustfaktor 1,03 berücksichtigt (siehe Unterkapitel 3.1.2).

MZ

Die Mittelzone wird ausschließlich über die DEA HEIN MZ versorgt. Da diese DEA keine weitere Zone mitversorgt, ist der Energiebedarf der DEA HEIN MZ gleich der benötigten Energie zur Versorgung der MZ.

3.2.3. Plausibilitätsprüfung

In Unterkapitel 3.1.1 wird dargelegt, dass den durch die Wasserzähler gemessenen Stundenwerten nicht uneingeschränkt vertraut werden kann, da nicht bekannt ist, wann und ob die Wasserzähler geeicht wurden. Um die Aussagekraft der Daten zu überprüfen, werden die in die HZs geförderten Wassermengen sowie der teilweise über die Wassermengen ermittelte Energiebedarf der DEAs einer Plausibilitätsprüfung unterzogen.

Fördermengen

Die im Jahr 2013 in die HZs geförderten Wassermengen werden mit dem Wasserverbrauch im Jahr 2012 verglichen. Die Werte zum Jahreswasserverbrauch 2012 entstammen den Kundenverbrauchsabrechnungen und werden mit dem Wasserverlustfaktor 1,03 multipliziert. Die über das ÜSV HEIH in die NZ abgeleitete Menge ist im Wasserverbrauch 2012 der HZ3a nicht enthalten und wird deshalb vor der Differenzbildung von der Fördermenge 2013 der HZ3a abgezogen. Wie in Kapitel 3.2.2 erwähnt, wird für die Berechnung des anteiligen Energiebedarfs der HZ3b, aufgrund der fehlenden Messtechnik, der Wasserverbrauch 2012 aus STANET verwendet. Deshalb ist eine Plausibilitätsprüfung dieser Zonenmenge nicht möglich.

Um die Verbrauchsschwankungen zwischen den Jahren 2012 und 2013 zu berücksichtigen, werden die Jahresabgabemengen an Haushalte und Kleingewerbe von vier umliegenden Gemeinden aus diesen Jahren verglichen.

Energiebedarf

Die Daten zum Energiebedarf für das im Jahr 2013 in die HZs gepumpte Wasser entstammen für die DEAs MARI, HEIN und OBER größtenteils aus gemessenen Werten. Die Messung erfolgt direkt an den Pumpen. In geringem Umfang werden fehlende Messwerte durch Hochrechnungen ersetzt, um den gesamten Energiebedarf für das Jahr 2013 zu ermitteln.

Um die Plausibilität dieser Hochrechnungen, aber auch die Plausibilität der an den Pumpen gemessenen Werte zu überprüfen, wird der Energiebedarf der DEAs mit dem Energiebedarf verglichen, den der Energieversorger über seine Zähleranlagen in den Betriebsstätten der einzelnen DEA ermittelt und der ENTEGA in Rechnung stellt. Die Zähleranlagen des Energieversorgers messen dabei den von der gesamten Anlage verbrauchten Strom.

Zum Verbrauch der Pumpen der DEAs MARI und HEIN kommt ein geringfügiger zusätzlicher Verbrauch weiterer Stromabnehmer (z.B. Licht) dazu.

Die DEA OBER ist in der Betriebsstätte des HB OBER untergebracht. Der Zähler des Energieversorgers misst den in der gesamten Anlage verbrauchten Strom. Neben den Pumpen der DEA OBER und den weiteren Stromabnehmern zählt dazu noch der Verbrauch der Luftentfeuchtungsanlage und der Verbrauch, der bei betrieblichen Maßnahmen wie der jährlichen HB-Reinigung anfällt.

Die DEA MATH besitzt keinen Stromzähler vom Versorger. Die Abrechnung erfolgt über eine Vereinbarung zwischen Versorger und Kunden. Deshalb kann hier keine Plausibilitätsprüfung vorgenommen werden.

3.3. Grundsätzliche Überlegung zur Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs im SOLL-Zustand

Bevor auf die Methoden zur Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs zur Versorgung der MZ_{SOLL} eingegangen wird, werden in diesem Unterkapitel die grundlegenden Überlegungen dazu vorgestellt. Basierend auf Formel 2.1 wird zur Berechnung des elektrischen Energiebedarfs E_{el} der elektrische Leistungsbedarf der Pumpen P_{el} sowie die Jahresbetriebsstunden t benötigt, über die der Leistungsbedarf P_{el} abgerufen wird. Um den Leistungsbedarf P_{el} zu ermitteln, bedarf es laut Formel 2.2 der Förderhöhe H , des Förderstroms Q sowie des Gesamtwirkungsgrads η_G . Aus den Formeln 2.1 und 2.2 ergibt sich:

$$E_{el} = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q \cdot t}{\eta_G} [kWh] \quad (3.11)$$

Der elektrische Energiebedarf soll für ein gesamtes Jahr ermittelt werden. Über die Zeit gesehen schwanken die Förderhöhe H , der Förderstrom Q sowie der Gesamtwirkungsgrad η_G in Abhängigkeit des Wasserverbrauchs der MZ_{SOLL}. Die Methoden zur Bestimmung dieser Variablen werden in den folgenden Unterkapiteln 3.4, 3.5 und 3.6 vorgestellt. In Unterkapitel 3.7 wird beschrieben, wie über diese Variablen letztendlich der Energiebedarf zur Versorgung der MZ_{SOLL} ermittelt wird.

3.4. Lastprofil

In diesem Unterkapitel werden die Methoden zur Erstellung des Lastprofils der MZ_{SOLL} vorgestellt. Dieses soll das Verbrauchsverhalten der Abnehmer widerspiegeln. Das Lastprofil basiert auf vorliegenden Stundenwerten der Fördermengen aus dem Jahr 2013. Die MZ_{SOLL} umfasst die HZs 2a, 3a, 3b sowie die MZ_{ALT} .

Das Verbrauchsverhalten der Abnehmer der MZ_{ALT} sowie der HZ3b kann nicht in die Erstellung des Lastprofils der MZ_{SOLL} mit einbezogen werden. Wie in Kapitel 3.2.2 bereits erwähnt, werden für die HZ3b die von den dortigen Kunden verbrauchten Mengen aus dem Jahr 2012, inklusive des vom WVU angenommenen Wasserverlustes im Netz von 3 %, angesetzt. Die Werte stammen aus den vorliegenden Kundenabrechnungen aus dem Jahr 2012. Die MZ_{ALT} wird über die unregelmäßigen Pumpen der DEA HEIN versorgt. Druckbestimmender Hochbehälter ist der HB BÖLL. Die Pumpen werden je nach Behälterwasserstand an- oder ausgeschaltet, sodass sich das stündliche Verbrauchsverhalten normalerweise über die Differenz aus Fördermenge der Pumpen und Füllung/Entleerung des Hochbehälters bestimmen lässt. Diese Vorgehensweise führt allerdings in vielen Fällen zu negativen Verbräuchen, was theoretisch bedeutet, dass die Verbraucher in diesen Fällen Wasser lieferten. Diese Widersprüchlichkeit weist darauf hin, dass entweder die Messtechnik zu ungenau ist oder die Messungen des Behälterwasserstandes und der Fördermenge zeitlich zueinander verschoben sind. Die Stundenwerte der MZ_{ALT} sind somit für die Erstellung des Lastprofils der MZ_{SOLL} ungeeignet.

Für die HZs 2a und 3a liegen Stundenwerte der Fördermengen der jeweiligen DEAs und DMAs vor. Aus diesen lässt sich das Verbrauchsverhalten der Abnehmer der HZs 2a und 3a ableiten und das Lastprofil für diese HZs erstellen.

Im Folgenden wird dargestellt, wie aus den Stundenwerten der einzelnen DEAs und DMAs das zusammengefasste Lastprofil der HZ2a und 3a für das Jahr 2013 ermittelt und dieses auf den Verbrauch der gesamten MZ_{SOLL} extrapoliert wird. Anschließend wird erläutert, wie ein Eindruck darüber vermittelt werden soll, ob die für das Lastprofil der MZ_{SOLL} zugrunde gelegten Fördermengen 2013 aus einem verbrauchsärmeren oder verbrauchsstärkeren Jahr stammen.

3.4.1. Extrapolation und Klassifizierung

Um das Lastprofil der MZ_{SOLL} zu erstellen, werden die vorhandenen und verwertbaren Stundenwerte der HZs 2a und 3a verwendet und auf die fehlenden Stundenwerte der MZ_{ALT} sowie der HZ3b extrapoliert.

Der zukünftige Verbrauch der MZ_{SOLL} ergibt sich aus dem in Unterkapitel 4.1 ermittelten Jahreswasserverbrauch der HZs 2a, 3a, 3b und MZ_{ALT} . Der Jahreswasserverbrauch dieser HZs basiert auf den Fördermengen aus dem Jahr 2013.

Im Zuge der Netzanpassungen wird das Areal des Studentenwohnheims Karlshof mit in die MZ_{SOLL} eingegliedert. Bis dahin wurde das Studentenwohnheim durch die NZ versorgt. Für die Extrapolation wird deshalb auf den Wasserbedarf der HZs 2a, 3a, 3b und der MZ_{ALT} zusätzlich der Wasserbedarf des Studentenwohnheims addiert. Daraus ergibt sich die zukünftige jährliche Fördermenge der MZ_{SOLL} $V_a(MZ_{SOLL})$. Aus der Fördermenge $V_a(MZ_{SOLL})$ und der 2013 in die HZs 2a und 3a geförderten Menge $V_a(HZ_{2a+3a})$, für die die einzelnen Stundenwerte vorhanden sind, wird der Extrapolationsquotient q gebildet:

$$q = \frac{V_a(HZ_{2a+3a})}{V_a(MZ_{SOLL})} [-] \quad (3.12)$$

Um die extrapolierten Stundenwerte der MZ_{SOLL} $V_{hi}(MZ_{SOLL})$ zu erhalten, werden die Stundenwerte der HZs 2a+3a $V_{hi}(HZ_{2a+3a})$ durch den Extrapolationsquotienten q geteilt.

$$V_{hi}(MZ_{SOLL}) = \frac{V_{hi}(HZ_{2a+3a})}{q} [m^3] \quad (3.13)$$

Die auf den Jahresverbrauch der MZ_{SOLL} extrapolierten Werte werden zur Erstellung des Lastprofils in Klassen eingeteilt.

3.4.2. Einordnung der Jahresfördermenge 2013 in den üblichen Wasserverbrauch der Stadt Darmstadt

Um einen Eindruck darüber zu bekommen, ob die für das Lastprofil der MZ_{SOLL} zugrunde gelegten Fördermengen 2013 aus einem verbrauchsärmeren oder verbrauchsstärkeren Jahr stammen, wird die Wasserabgabe der Stadt Darmstadt an Haushalte und Kleingewerbe aus dem Jahr 2013 mit der Wasserabgabe der Stadt aus anderen Jahre seit der Jahrtausendwende verglichen.

3.5. Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade

In diesem Unterkapitel werden die Methoden zur Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade der DEAs OETI, HEIN und MATH vorgestellt. Die Gesamtwirkungsgrade ergeben sich aus der Leistungsmessung der DEA OETI und den Leistungsprüfungen, die vom Pumpenhersteller zur Verfügung gestellt werden.

Über die Leistungsmessung der DEA OETI konnten für sechs Förderströme jeweils ein Gesamtwirkungsgrad $\eta_{G,mess}$ gemessen werden. Zur späteren Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs der MZ_{SOLL} werden die Gesamtwirkungsgrade η_G für eine Vielzahl weiterer Förderströme im Bereich von 75 bis 425 m³/h benötigt. Es wird angenommen, dass die Gesamtwirkungsgrade mit steigendem Förderstrom sinken, da bei steigender Durchflussgeschwindigkeit die Druckverluste an Druck- und Saugbalken sowie den Rückschlagklappen zunehmen (siehe Formel 2.5). Mit Hilfe der gemessenen Gesamtwirkungsgrade $\eta_{G,mess}$ und den vom Pumpenhersteller zur Verfügung gestellten Pumpenwirkungsgraden η_{Pu} wird in diesem Unterkapitel eine Funktion erstellt, mit der die Gesamtwirkungsgrade η_G im Bereich von 75 bis 425 m³/h ermittelt werden können. Die DEAs OETI und HEIN sind baugleich, werden also mit den gleichen Pumpenanlagen ausgestattet. Deshalb wird angenommen, dass die Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade basierend auf der Leistungsmessung der DEA OETI genauso für die DEA HEIN gilt. Für die DEA MATH sind keine konkreten Planungen vorhanden. Deshalb kann der Gesamtwirkungsgrad mit der obigen Methode nur näherungsweise bestimmt werden.

Zunächst wird dargestellt, auf welche Weise die Funktion zur Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade erstellt wird. Darauf folgt die Vorstellung der Methoden, die zur Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade der DEAs HEIN und OETI sowie abschließend der DEA MATH angewendet werden.

3.5.1. Funktion $f(Q)$ und Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade der DEAs HEIN und OETI

Zunächst wird folgende Überlegung vorangestellt. Durch Umstellen der Formel 2.3 ergibt sich das Verhältnis aus $\eta_{G,mess}$ zu η_{Pu} als Produkt der bei den errechneten Pumpenwirkungsgraden nicht berücksichtigen Wirkungsgraden des Kabels, FUs, des Motors sowie der Kupplung. Während der Leistungsmessung speiste die DEA OETI in die MZ_{ALT} ein. Daraus ergibt sich, dass die an Druck- und Saugbalken sowie den Rückschlagklappen bis zum Druckmesser entstehenden Druckverluste in den ermittelten Gesamtwirkungsgrad $\eta_{G,mess}$ mit eingeflossen sind. Dieser Faktor wird hier als Anlagenwirkungsgrad η_{An} bezeichnet. Das Verhältnis aus $\eta_{G,mess}$ zu η_{Pu} wird durch folgende Formel beschrieben:

$$\frac{\eta_{G,mess}}{\eta_{Pu}} = \eta_{Kabel} \cdot \eta_{FU} \cdot \eta_{Motor} \cdot \eta_{Kupplung} \cdot \eta_{Anlage} [-] \quad (3.14)$$

Da der Anlagenwirkungsgrad η_{An} durch steigende Druckverluste bei steigendem Förderstrom sinkt, ist das Verhältnis von $\eta_{G,mess}$ zu η_{Pu} abhängig vom Förderstrom:

$$\frac{\eta_{G,mess}}{\eta_{Pu}} = f(Q) \quad (3.15)$$

Die Funktion $f(Q)$ wird durch die ermittelten Gesamtwirkungsgrade $\eta_{G,mess}$ und die Pumpenwirkungsgrade η_{Pu} näherungsweise bestimmt.

In der Leistungsmessung vom 09.12.2014 wurden sechs Gesamtwirkungsgrade $\eta_{G,mess}$ der DEA OETI in Abhängigkeit der Förderströme ermittelt. Die vier Pumpen der DEA sind jeweils auf eine Förderhöhe von 41,5 m bei einem Förderstrom von 90 m³/h ausgelegt. Wird eine Pumpe in diesem Bereich betrieben, ist der Wirkungsgrad optimal. Je nach Bedarf werden Pumpen zugeschaltet. Die getesteten Förderströme reichen von 75 bis 340 m³/h. Für die spätere Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs werden darüber hinaus die Gesamtwirkungsgrade für weitere Förderströme im Bereich von 75 bis 425 m³/h benötigt. Um die Gesamtwirkungsgrade η_G zu ermitteln, wird aus der Entwicklung der gemessenen Gesamtwirkungsgrade $\eta_{G,mess}$ bei steigendem Förderstrom die Funktion $f(Q)$ ermittelt. Die gemessenen Gesamtwirkungsgrade $\eta_{G,mess}$ sind in Tabelle 19 im Anhang auf S. XXX aufgeführt. Die Pumpenwirkungsgrade η_{Pu} stammen aus den vom Hersteller bereitgestellten Daten der Leistungsprüfungen. Die hier verwendeten Pumpenwirkungsgrade finden sich im Anhang auf S. XXVII in Tabelle 18.

Aus den ins Verhältnis zu den Pumpenwirkungsgraden η_{Pu} gesetzten Gesamtwirkungsgraden $\eta_{G,mess}$ ergibt sich ein Zusammenhang nach der Funktion $f(Q)$ (siehe Formel 3.15). Mit Hilfe der Funktion $f(Q)$ und den Pumpenwirkungsgrade η_{Pu} können die Gesamtwirkungsgrade η_G für den Bereich von 75 bis 425 m³/h ermittelt werden.

3.5.2. Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade der DEA MATH

Bisher gibt es nur grundsätzliche Überlegungen die DEA MATH in das Versorgungskonzept zu integrieren und in Zukunft zu modernisieren. Deshalb liegt für diese DEA keine Leistungsmessung vor. Der Gesamtwirkungsgrad kann folglich nur näherungsweise ermittelt werden. Dies erfolgt nach dem obigen Prinzip. Über die Funktion $f(Q)$ aus der Leistungsmessung der DEA OETI und den Pumpenwirkungsgrad η_{Pu} der DEA MATH wird der Gesamtwirkungsgrad η_G ermittelt. Dabei gilt es zu beachten, dass die DEA MATH als Grundlastanlage ohne FU ausgerüstet ist. Im Folgenden wird das Vorgehen zur Ermittlung des Gesamtwirkungsgrad η_G genauer erläutert.

Die genaue Ausrüstung der Pumpen der DEA MATH ist noch nicht festgelegt. Die Pumpen werden je nach zu erwartender Förderhöhe konfiguriert.

Im Anhang ab S. XXVIII wird eine Auswahl der Konfiguration unter energetisch optimierten Gesichtspunkten getroffen. Aus dieser Auswahl und dem angestrebten Förderstrom von 90 m³/h ergibt sich der Pumpenwirkungsgrad η_{pu} der DEA MATH.

Es wird angenommen, dass die neue Anlage der DEA MATH im Aufbau den Anlagen der DEAs OETI und HEIN ähnelt. Damit kann die für die DEA OETI und HEIN ermittelte Funktion $f(Q)$, die nach den Formeln 3.14 und 3.15 das Verhalten der Wirkungsgrade aus Kabeln, FU, Motor, Kupplung und Anlage in Abhängigkeit des Förderstroms wieder gibt, verwendet werden. Lediglich der Wirkungsgradanteil des FU entfällt, da die DEA MATH als Grundlastanlage vorgesehen ist. Der Wirkungsgrad des FU liegt laut Pumpenhersteller zwischen 97 und 99 %. Es wird ein Wirkungsgrad von 98 % angenommen.

Über die Funktion $f(Q)$ und den Pumpenwirkungsgrad η_{pu} wird nach obigem Vorbild der Gesamtwirkungsgrad ermittelt. Dieser wird durch den Wirkungsgrad des FU dividiert, um den endgültigen Gesamtwirkungsgrad η_G der DEA MATH zu ermitteln.

3.6. Voraussetzungen zur Ermittlung der Förderhöhe über STANET

In diesem Unterkapitel werden die Arbeitsschritte vorgestellt, durch die im Rechnernetzmodell die Voraussetzungen dafür geschaffen werden, die hydraulischen Bedingungen der MZ_{SOLL} möglichst genau abzubilden. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden mit dem Netzberechnungsprogramm STANET hydraulische Simulationen durchgeführt, um die nötige Förderhöhe zur Netzdruckhaltung zu ermitteln. Alle hier getroffenen Veränderungen haben also im Anschluss direkten Einfluss auf die Ermittlung der Förderhöhe. In den späteren Berechnungen beeinflusst das Ausmaß der Förderhöhe den elektrischen Energiebedarf der Pumpen.

Zur Durchführung der Simulationen wird aus dem beim WVU verwendeten Rechnernetzmodell des gesamten Versorgungsgebietes ein Teil des Modells extrahiert, das nur die Darmstädter HZs umfasst. Diese Vorgehensweise beschränkt die Simulationen auf das Wichtigste und verkürzt die Simulationszeit um ein Vielfaches. Die Zuflüsse aus der NZ werden durch Druckknoten unmittelbar vor den Pumpenanlagen der DEAs simuliert. Die Druckknoten werden mit einem definierten Vordruck versehen. Die Wasserabgabe nach Ober- und Nieder-Ramstadt sowie Traisa wird über Abnehmer simuliert.

In diesem Unterkapitel wird als erstes die Kalibrierung des Rechnernetzmodells vorgestellt. Durch diese bedingt sich die Genauigkeit der Simulationen.

Im Anschluss daran werden die Methoden zur Abbildung der Vordrucksituation der DEAs erläutert. Nach DARCY-WEISBACH (Formel 2.4) wird die aufzubringende Förderhöhe der Pumpen durch den Vordruck mitbestimmt. In einem ersten Schritt sollen die in der Realität dynamischen Vordrücke anhand von vorhandenen Vordruckdaten analysiert werden. Durch die Analyse sollen sich mittlere, zu erwartende Vordrücke ergeben, die im Rechnernetzmodell an den Druckknoten der DEAs als feste Werte angelegt werden. Dazu werden aus vorliegenden Messwerten bestimmte Betriebspunkte ermittelt und die dazugehörigen Vordrücke der DEAs verglichen. Weiterhin werden unterschiedliche Faktoren betrachtet, die auf die Ausbildung des Vordrucks Einfluss nehmen. In einem zweiten Schritt sollen die niederzonenseitigen Druckverluste während des Pumpenbetriebs ermittelt werden, um sie in den Simulationen berücksichtigen zu können. In der Realität werden Druckverluste aufgrund der Wasserförderung in den Leitungen vor und nach den Pumpen erzeugt. Die vor den Pumpen auftretenden Druckverluste werden in den Simulationen bislang noch nicht berücksichtigt, da die Druckknoten unmittelbar vor den Pumpen der DEAs angeordnet sind und den Pumpen einen konstanten Zustrom bei konstantem Druck gewähren. Um die Druckverluste vor den Pumpen zu berücksichtigen, wird zunächst aus den vorliegenden Messwerten ein Druckverlust ermittelt, der bei einem gewissen Förderstrom vor den Pumpen einer DEA auftritt. Daraufgehend werden im Rechnernetzmodell Leitungen in der Gestalt vor den Pumpen der DEAs verlegt, dass sich in den Simulationen bei gleichem Förderstrom der ermittelte Druckverlust vor den jeweiligen DEAs einstellt.

Nachdem die Methoden zur Abbildung der Vordrucksituation der DEAs erläutert wurden, erfolgt als Abschluss dieses Unterkapitels die Vorstellung aller weiteren durchgeführten Anpassungen am Rechnernetzmodell und den Simulationsvorgaben.

3.6.1. Kalibrierung des Rechnernetzmodells und Genauigkeit der Simulationen

Im Folgenden wird die Kalibrierung des Rechnernetzmodells und die Methode zur Ermittlung der von der Kalibrierung abhängenden Genauigkeit der Simulationen vorgestellt.

2013 fand eine Feinkalibrierung der Hochzonen nach GW 303 statt. Ein Modellnetz gilt dann als ausreichend kalibriert, „wenn die Abweichungen der errechneten von den gemessenen Drücken“ 2 % des Ruhedrucks am Messpunkt, maximal jedoch 0,2 bar nicht überschreiten (DVGW GW 303-1, S. 16). Um die Genauigkeit der Simulationen zu bestimmen, wird im Rechnernetzmodell der Knoten mit dem maximalen Ruhedruck $p_{ruh,max}$ ermittelt. Alle errechneten Drücke sind demnach auf $\pm 2 \%$ von $p_{ruh,max}$ genau.

3.6.2. Vordrucksituation der DEAs

Die Abbildung der Vordrucksituation der DEAs gliedert sich in zwei Schritte. Im ersten Schritt werden die Methoden der Vordruckanalyse zur Ermittlung der in STANET angesetzten Vordrücke vorgestellt. Im zweiten Schritt wird die Methode vorgestellt, durch die die während des Pumpenbetriebs entstehenden niederzonenseitigen Druckverluste in den Simulationen berücksichtigt werden.

Vordruckanalyse: Ermittlung der in STANET angesetzten Vordrücke

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Durchführung der Vordruckanalyse vorgestellt. Durch diese soll der zu erwartende, durchschnittliche Vordruck vor jeder DEA ermittelt werden. Dabei wird besonderes Augenmerk auf etwaige Unterschiede zwischen den Vordrücken der einzelnen DEAs gelegt, da solche bei der späteren Pumpensteuerung Möglichkeiten zur Energieeinsparung liefern könnten.

Es wird vermutet, dass die Vordrücke je nach Füllverhalten des HB OBER, der Verbrauchssituation der NZ, die durch die Tageszeit bestimmt wird, sowie dem aktuellen Förderzustand der DEAs schwanken. Um möglichst genaue Informationen zu den anliegenden Vordrücken zu erhalten, werden aus den vorliegenden Messwerten bestimmte Betriebspunkte ermittelt und die dazugehörigen Vordrücke der DEAs verglichen. Es werden verschiedene Messreihen aus dem Jahr 2014 herangezogen. Das Jahr 2014 bietet sich an, da die DEA OETI ihren regulären Betrieb Ende 2013 aufgenommen hat und ab diesem Zeitpunkt Daten zu den Vordruckverhältnissen der DEA OETI bekannt sind.

Es liegen Stundenwerte zu den Fördermengen sowie Vor- und Nachdrücken der betrachteten DEAs vor.

Um die Vordrücke zwischen den DEAs vergleichen zu können, müssen Messreihen aus diesen Stundenwerten systematisch unter Variation der verschiedenen Einflussfaktoren ausgewählt werden. Die Stundenwerte werden demzufolge unter Variation des Füllverhaltens des HB OBER, der Tageszeit, sowie des Förderzustands der betrachteten DEAs ausgewählt. Insgesamt werden 14 Messreihen, die nach dem Förderzustand in 5 Gruppen eingeteilt werden, miteinander verglichen.

Zuerst wird die Beeinflussung der Vordrücke durch den schwankenden Behälterwasserstand des druckbestimmenden HB OBER eliminiert. Darauf folgt eine Analyse mit dem Ziel, die Vertrauenswürdigkeit der von den Druckmessern gelieferten Daten einschätzen zu können. Dazu wird über einen Vergleich der Vordrücke zwischen den DEAs die vom Hersteller angegebene Fehlertoleranz sowie der Kalibrierungszustand der Druckmesser überprüft. Im Anschluss wird untersucht, ob das Befüllen und Entleeren des HB OBER einen Einfluss auf die Ausbildung unterschiedlicher Vordrücke hat. Es wird vermutet, dass die dadurch veränderten Strömungsbedingungen im Netz die Vordrücke der DEAs unterschiedlich stark beeinflussen. Danach wird die Annahme überprüft, dass durch den Betrieb einer DEA der dort anliegende Vordruck örtlich begrenzt abgesenkt wird. Als Abschluss wird untersucht, ob die von der Tageszeit abhängige Verbrauchssituation der NZ einen Einfluss auf die Ausbildung unterschiedlicher Vordrücke vor den DEAs hat.

Die dazu ausgewählten Messreihen werden im Anhang in Tabelle 21 dargestellt. Die detaillierte Vorgehensweise zur Bestimmung der Vordruckverhältnisse der DEAs sowie die daraus ermittelten Ergebnisse sind im Anhang ab S. XXXIII einzusehen. Aus den ermittelten Ergebnissen werden im Ergebnisteil dieser Arbeit die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst wiedergegeben. Daraufhin werden Schlussfolgerungen gezogen, aus denen die Festlegung der in STANET angelegten Vordrücke erfolgt.

Berücksichtigung der niederzonenseitigen Druckverluste

Fördert eine DEA mit einem gewissen Förderstrom aus der NZ in die dahinterliegende HZ, sinkt in der Realität der Vordruck der DEA in Abhängigkeit des Förderstroms der Pumpen und der Netzbedingungen der NZ. Dies wird auch durch die Ergebnisse der oben aufgeführten Untersuchungen zu den Vordrücken der DEAs bestätigt (siehe S. XXXV ff). Der durch den Betrieb der DEAs niederzonenseitig induzierte Druckverlust wirkt sich auf die aufzuwendende Pumpenergie der DEAs aus und muss zur späteren Ermittlung des Energiebedarfs zur Versorgung der MZ_{SOLL} berücksichtigt werden.

Im vorliegenden Rechnetzmodell wird dieser niederzonenseitige Druckverlust nicht berücksichtigt, da im Netzmodell die Zuflüsse über die Druckknoten unmittelbar vor den Pumpen anliegen. Die Druckknoten geben einen konstanten Druck vor, sodass keine durch Rohrreibung bewirkten Druckverluste vor den Pumpen simuliert werden.

Um die vom Förderstrom abhängige Vordruckabsenkung im Modell abbilden zu können, werden zwischen den Druckknoten und den Pumpen der DEAs Leitungen verlegt. Diese Leitungen sorgen je nach Volumenstrom, Länge, Durchmesser und Rauigkeit für einen Druckverlust vor den Pumpen. Es kann nicht genau ermittelt werden, in wie weit netzbedingt unterschiedliche Druckverluste vor den jeweiligen DEAs entstehen (siehe Unterkapitel 4.4.2). Die niederzonenseitig unmittelbar an die DEAs anschließenden Hauptleitungen bestehen aus unterschiedlichen Materialien und wurden zu unterschiedlichen Zeiten verbaut. Deshalb kann kein durchgängiger Wert für die Rohrrauigkeit ermittelt werden. Des Weiteren verzweigen sich die Hauptleitungen teilweise direkt vor dem Zulauf zu den DEAs, sodass eine den realistischen Bedingungen entsprechende Abbildung der realen Verhältnisse für diese Arbeit zu aufwendig ist. Um zwischen den DEAs ungerechtfertigte Unterschiede durch die Abbildung der Vorbedingungen zu vermeiden, werden die Leitungen jeweils in gleicher Länge, Rauigkeit und gleichem Durchmesser verlegt.

Für die zu verlegenden Leitungen wird Grauguss DN 400 mit der Rauigkeit 2 mm verwendet. Das Material und der Durchmesser entsprechen einer typischen Hauptleitung, wie sie im realen Netz vor den DEAs vorhanden sind. Die Rauigkeit von 2 mm ist eine typische Annahme zur Berücksichtigung der Inkrustationen, die sich im Laufe mehrerer Jahrzehnte in solchen Leitungen bilden (Wolle 2015).

Um einen Eindruck über die Größenordnung der durch den Betrieb einer DEA entstehenden lokalen Druckverluste vor den Pumpen zu gewinnen, werden die ausgewählten Messreihen daraufhin untersucht. Die detaillierte Vorgehensweise zur Bestimmung der Druckverluste sowie die daraus ermittelten Ergebnisse sind im Anhang ab S. XXXIX einzusehen. Im Ergebnisteil wird das Ergebnis in zusammengefasster Form wiedergegeben.

Über den ermittelten Druckverlust bei gegebenem Förderstrom einer DEA und den festgelegten Leitungseigenschaften kann mit dem Rechnetzmodell in STANET die für die Simulation der Druckverluste erforderliche Leitungslänge berechnet werden. Daraufgehend wird zwischen die Pumpen der DEAs und den jeweiligen Druckknoten jeweils eine Leitung mit den oben festgelegten und ermittelten Eigenschaften gelegt.

3.6.3. Sonstige Anpassungen am Rechnetzmodell und der Simulationsvorgaben

Neben der Bestimmung der an den DEAs anliegenden Vordrücken und der Berücksichtigung der niederzonenseitigen Druckverluste durch die Verlegung von Rohrleitungen werden noch weitere Anpassungen am vorliegenden Rechnetzmodell vorgenommen. Dazu werden im Folgenden einige Beispiele aufgeführt.

Zu den Anpassungen gehören Veränderungen, die die Netzstrukturen des Modells betreffen. Es werden beispielsweise Rohrdurchmesser aus dem ALT-Zustand an den SOLL-Zustand angepasst oder Leitungen der MZ_{SOLL} verlegt, die im vorliegenden Rechnernetzmodell noch nicht vorhanden sind.

Weitere Anpassungen werden im Bereich der Simulationsvorgaben vorgenommen. Diese Anpassungen müssen erfolgen, um die Simulationen unter den richtigen Rahmenbedingungen durchführen zu können. Beispielsweise wird zu jeder der 5 Klassen des Lastprofils ein Verbrauchsprofil erstellt, um die dort ermittelten Lastfälle in die Simulationen zu übertragen. Des Weiteren werden für die neuen Pumpen der DEAs HEIN, OETI und MATH die Pumpenkennlinien hinterlegt, die der Pumpenhersteller in seinen Leistungsprüfungen ermittelt hat.

Alle weiteren Anpassungen am Rechnernetzmodell und den Simulationsvorgaben werden im Anhang ab S. XL dargelegt.

3.7. Elektrischer Energiebedarf SOLL-Zustand und Pumpensteuerung

In diesem Unterkapitel werden die Methoden vorgestellt, mit denen aus den zuvor ermittelten Förderströmen Q , den Jahresbetriebsstunden t und den Gesamtwirkungsgraden η_G sowie den hier mit Hilfe des Rechnernetzmodells zu bestimmenden Förderhöhen H der elektrische Energiebedarf der MZ_{SOLL} nach Formel 3.11 berechnet werden. Um eine Pumpensteuerung zu ermitteln, die den Energiebedarf minimiert, werden mehrere Pumpensteuerungen durchgerechnet und miteinander verglichen. Dabei werden die Förderströme zu unterschiedlichen Anteilen auf die DEAs aufgeteilt. Beim Vergleich der Pumpensteuerungen werden quantifizierbare Fehler aus den vorher angewandten Methoden berücksichtigt. Der Energiebedarf zwischen den Pumpensteuerungen wird nur dann als wesentlich unterschiedlich angesehen, wenn die Unterschiede außerhalb der Schwankungsbreite der quantifizierbaren Fehler liegen. Die Schwankungsbreite der quantifizierbaren Fehler wird in dieser Arbeit als Vertrauensbereich bezeichnet. Die Methode zur Aufteilung der Förderströme auf die DEAs schließt ungünstige Betriebspunkte mit schlechten Pumpenwirkungsgraden größtenteils aus. Um einen Eindruck darüber zu gewinnen, wie sich der Energiebedarf beim Pumpenbetrieb in ungünstigen Pumpenwirkungsgradbereichen entwickelt, wird dazu eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

Bei den Berechnungen des Energiebedarfs wird davon ausgegangen, dass der Mindestversorgungsdruck nach DVGW W 400-1 A im höchsten Punkt des Netzes nicht überschritten wird. Dieser wird im Rechnernetzmodell bestimmt und als kritischer Knotenpunkt bezeichnet. Dieses Vorgehen soll sicherstellen, dass bei der Berechnung des Energiebedarfs zur Versorgung der MZ_{SOLL} das gesamte energetische Einsparpotenzial aufgezeigt wird.

Im Folgenden werden die Methoden zur Ermittlung des Energiebedarfs verschiedener Pumpensteuerungen, Bestimmung der Fehlertoleranzen, Auswahl der Pumpensteuerung sowie der Sensitivitätsanalyse vorgestellt.

3.7.1. Ermittlung des Energiebedarfs verschiedener Pumpensteuerungen

Der elektrische Energiebedarf wird für jeden Förderstrom jeder Pumpensteuerung nach Formel 3.11 ermittelt. Die Bestimmung der dazu notwendigen Variablen Förderstrom Q , Gesamtwirkungsgrad η_G , Zeitfaktor t und Förderhöhe H wird im Folgenden erläutert. Als Grundlage dienen die im Lastprofil ermittelten und klassifizierten Förderströme Q . Diese werden je nach Pumpensteuerung auf die DEAs aufgeteilt. Über die in Unterkapitel 3.5 dargestellte Methode wird der Gesamtwirkungsgrad η_G jedes Förderstroms ermittelt. Der Zeitfaktor t ergibt sich aus den Jahresbetriebsstunden der Förderströme Q des Lastprofils. Zur Ermittlung der notwendigen Förderhöhe zur Netzdruckhaltung wird im Rechnernetzmodell in STANET der zu simulierende Förderstrom über die in der zu analysierenden Pumpensteuerung festgelegten DEAs ins Netz eingespeist. Die zur Simulation nötige Abnahme wird über das entsprechende im Rechnernetzmodell eingepflegte Verbrauchsprofil sichergestellt.

Der Solldruckregler hinter den Pumpen wird so eingestellt, dass am kritischen Knotenpunkt der Mindest-Versorgungsdruck ansteht. Werden Förderströme auf mehrere DEAs aufgeteilt, werden die Regler aller bis auf einer DEA auf Flussregelung umgestellt und die Zielförderströme dieser DEAs vorgegeben. Über den Druckregler der verbliebenen DEA wird der Druck am kritischen Knotenpunkt reguliert. Zur Ermittlung der Förderhöhe H werden jeweils die Druckhöhen unmittelbar vor und nach den Pumpen der DEAs ausgelesen und voneinander subtrahiert. Über die Formel 3.11 kann nun für jeden Förderstrom Q jeder Pumpensteuerung der Jahresenergiebedarf ermittelt werden.

3.7.2. Bestimmung der Vertrauensbereiche

Die angewendeten Methoden zur Ermittlung der Variablen Förderstrom Q und Jahresbetriebsstunden t , Gesamtwirkungsgrad η_G sowie Förderhöhe H , besitzen eine gewisse Genauigkeit. Die Genauigkeit zur Ermittlung der Förderhöhe H kann quantifiziert werden. Um die quantifizierbare Genauigkeit bei der Bestimmung der Pumpensteuerung zu berücksichtigen, wird aus diesen ein Vertrauensbereich bei der Ermittlung des Energiebedarfs jeder Pumpensteuerung gebildet.

Um den Vertrauensbereich zu bilden, werden zwei weitere Berechnungen des Energiebedarfs für jede Pumpensteuerung durchgeführt. Die beiden Berechnungen erfolgen unter der Annahme, dass die Ungenauigkeiten bei der Ermittlung von H entweder zu einem höheren oder geringeren Energiebedarf führen, als durch die ursprüngliche Berechnung angenommen.

Die Genauigkeit der ermittelten Förderhöhe H ergibt sich aus der Kalibrierung des Rechnernetzmodells, mit dem die zur Netzdruckhaltung notwendige Förderhöhe simuliert wird. Die Genauigkeit der Drücke, aus denen sich wiederum die Genauigkeit der Förderhöhe ableiten lässt, ergibt sich nach Unterkapitel 3.6.1 zu $\pm 2 \%$ von $p_{ruh,max}$.

3.7.3. Bestimmung der Pumpensteuerung

Innerhalb jeder Pumpensteuerung ergibt sich für jeden der fünf klassifizierten Förderströme ein Jahresenergiebedarf. Der Jahresenergiebedarf der Förderströme wird zwischen den Pumpensteuerungen verglichen. Der Energiebedarf zwischen den Pumpensteuerungen wird nur dann als wesentlich unterschiedlich angesehen, wenn die Unterschiede außerhalb der Vertrauensbereiche liegen.

3.7.4. Sensitivitätsanalyse

Bei der oben aufgeführten Methode zur Ermittlung des Energiebedarfs verschiedener Pumpensteuerungen werden die Förderströme der fünf klassifizierten Lastfälle so auf die DEAs aufgeteilt, dass die Pumpenwirkungsgrade η_{Pu} häufig im optimalen Bereich über 75 % liegen. Dies muss später auch das Ziel im realen Betrieb der Anlagen sein. Trotzdem wird es vorkommen, dass die Anlagen nicht immer in guten Wirkungsgradbereichen betrieben werden können.

Um die Auswirkungen eines permanenten Pumpenbetriebs in schlechten Pumpenwirkungsgradbereichen auf die Entwicklung des Energiebedarfs bestimmen zu können, wird eine Sensitivitätsanalyse vorgenommen. Dabei wird zunächst anhand der Leistungsprüfung des Pumpenherstellers der im späteren Betrieb ungünstigste, denkbare Pumpenwirkungsgrad ermittelt. Mit diesem wird nach obiger Methode der Energiebedarf einer Pumpensteuerung ermittelt und mit dem Energiebedarf der gleichen Pumpensteuerung beim Betrieb mit guten Pumpenwirkungsgraden verglichen.

3.8. Investitionsrechnung zur möglichen Integration der DEA MATH

Im folgenden Unterkapitel wird die Investitionsrechnung zur möglichen Integration der DEA MATH erläutert. Über die Investitionsrechnung soll die jährliche Vermögensänderung des WVU ermittelt werden, die durch die Investition in die Sanierung und Integration der DEA MATH in das Versorgungskonzept der MZ_{SOLL} entstände. Den Investitionen in Gebäudesanierung, Rohrleitungen sowie Pump-, Mess- und Fernwirktechnik stehen geringere jährliche Energiekosten gegenüber, die durch einen verminderten Energiebedarf zur Versorgung der MZ_{SOLL} erwartet werden. Zur Ermittlung der jährlichen Vermögensänderung wird die Annuitätenmethode angewendet. Diese wird im Folgenden erläutert. Abschließend wird das Vorgehen zur Durchführung einer Sensitivitätsanalyse erläutert. Über die Sensitivitätsanalyse kann die Investitionsentscheidung hinsichtlich eines steigenden Strompreises und der Genauigkeit der verwendeten Methode zur Ermittlung des Energiebedarfs abgesichert werden.

3.8.1. Die Annuitätenmethode

Die Annuitätenmethode ist ein dynamisches Verfahren der Investitionsrechnung. Sie ist eine Variante der Kapitalwertmethode und „ermittelt den jährlich gleich hohen Überschuss, der dem Investor neben der Kapitalwiedergewinnung und Verzinsung zur Verfügung steht“ (Becker 2012, S. 65). Der jährlich gleich hohe Überschuss wird Annuität genannt. Die Annuität a wird durch die Multiplikation des Annuitätenfaktors mit dem Kapitalwert K_0 ermittelt. Der Annuitätenfaktor ergibt sich aus dem angenommenen Diskontierungszinssatz i und der Nutzungsdauer n der Investition:

$$a = K_0 \cdot \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \quad [\text{€}] \quad (3.16)$$

Der Kapitalwert der Investition wird über die Kapitalwertmethode ermittelt. Er gibt den „Totalerfolg einer Investition wieder, d.h. den Erfolg, den die Investition über die gesamte Nutzungsdauer erwirtschaftet – berechnet auf den Zeitpunkt null, also auf den Zeitpunkt unmittelbar vor Investitionsbeginn. [...] Der Kapitalwert K_0 ist die Summe der Barwerte aller zukünftigen Ein- und Auszahlungen abzüglich der Anschaffungsauszahlung $[A_0]$ “ (Becker 2012, S. 61). Die Barwerte der zukünftigen Ein- und Auszahlungen $E_t - A_t$ ergeben sich aus der Diskontierung mit dem Diskontierungszinssatz i . Es wird davon ausgegangen, dass die Pumpen am Ende der Nutzungsdauer n zu einem Resterlöswert verkauft werden können. Dieser fließt als Liquidationserlös L_n in die Kapitalwertformel mit ein:

$$K_0 = -A_0 + \sum \left(\frac{E_t - A_t}{(1+i)^t} \right) + \frac{L_n}{(1+i)^n} \quad [\text{€}] \quad (3.17)$$

mit

t Jahresindex

3.8.2. Sensitivitätsanalyse

Die Investitionsrechnung wird auf ihre Sensitivität hinsichtlich zweier Faktoren überprüft. Zum einen wird die Rechnung auf die Sensitivität eines steigenden Strompreises überprüft. Des Weiteren wird über die Genauigkeit der Simulationen (siehe 3.6.1) die von den DEAs jeweils aufzubringende Förderhöhe zur Versorgung der MZ_{SOLL} variiert. Dabei wird in einer Variante „Pro DEA MATH“ die von der DEA MATH aufzubringende Förderhöhe um die Genauigkeit der Simulationen verringert, während die der anderen DEAs erhöht wird. Diese Variante spiegelt den Fall wider, dass die Strömungsverhältnisse im Rechnetzmodell durch die Kalibrierung im Rahmen der Genauigkeit so simuliert werden, dass die Effizienz der DEA MATH im Vergleich zu den anderen DEAs maximal negativ beeinflusst wird. „Pro DEA MATH“ heißt in diesem Fall, dass die Vertrauensbereiche zu Gunsten der Effizienz der DEA MATH ausgelegt werden. Die Variante „Contra DEA MATH“ stellt genau den umgekehrten Fall dar. Die Förderhöhe der DEA MATH wird für die Variante „Contra DEA MATH“ demnach erhöht und die der anderen DEAs verringert, um eine eventuelle „Bevorzugung“ der DEA MATH durch das Rechnetzmodell auszugleichen.

3.9. Suche nach weiterem energetischen Optimierungspotenzial

Im folgenden Unterkapitel wird die Vorgehensweise zur Suche nach weiterem energetischem Optimierungspotenzial erläutert. Die systematische Suche beschränkt sich in dieser Arbeit auf die Untersuchung des Netzes hinsichtlich des Potenzials, das sich aus hohen Druckverlusten ergibt. Darüber hinaus können weitere energetische Optimierungspotenziale in anderen Bereichen aufgedeckt werden, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Dazu wird auf die Unterkapitel 2.1.4 und 2.1.5 verwiesen.

Die Erarbeitung einer Methode zur systematischen Aufdeckung „zu hoher Druckverluste“ gestaltet sich für das vorliegende komplexe, vermaschte Netz mit mehreren Einspeisestellen als schwierig. In der Literatur sind keine Grenzwerte beschrieben, über die ein aus energetischer Sicht „zu hoher Druckverlust“ identifiziert werden könnte. Auch für die Fließgeschwindigkeiten, die den Druckverlust beeinflussen, ist es aus energetischer Sicht nicht möglich „Idealwerte anzugeben“ (DVGW-Information W Nr.77, S. 93). Nach dem Infoblatt DVGW-Information W Nr.77 sollten die in DVGW W 400-1 A angegebenen Richtwerte eingehalten werden. Diese reichen für Fließgeschwindigkeiten in einem Versorgungsnetz von 0,005 bis 2 m/s. Diese Richtwerte richten sich nach Qualitäts- und Sicherheitsaspekten. Die vorherrschenden Fließgeschwindigkeiten im vorliegenden Netz bewegen sich innerhalb dieser Richtwerte. Deshalb sind sie hier für eine weitergehende Untersuchung hinsichtlich der energetischen Optimierung unbrauchbar. Im Infoblatt DVGW-Information W Nr.77 werden zwei Methoden zur energetischen Bewertung der Fließgeschwindigkeiten und der Druckverluste aufgeführt. Die Methoden gehen von einer abschnittweisen Untersuchung des Netzes mit Hilfe von Druckverlustmessungen aus. Druckverlustmessungen können im Rahmen der Masterarbeit nicht durchgeführt werden, sodass auch diese Methoden nicht angewendet werden können.

Aus diesen Gründen wird hier eine eigene Methode zur Untersuchung des Netzes hinsichtlich der Druckverluste entwickelt. Die Methode orientiert sich aus betriebswirtschaftlicher Sicht am monetären Nutzen einer vorzeitigen Sanierung von Rohrleitungen. Ziel ist es, Rohrleitungen zu identifizieren, deren Sanierung die dort auftretenden Druckverluste soweit verringern würde, dass sich die vorgezogene Investition in die Sanierung durch die Einsparung von Pumpenergie rentiert. Die Untersuchung läuft in zwei Schritten ab und wird im Folgenden beschrieben.

Untersuchung des Rohrnetzes hinsichtlich druckverlustbedingtem Optimierungspotenzial

Zuerst wird die potentielle jährliche Energieeinsparung pro abgesenktem Meter Förderhöhe ermittelt. Dazu wird die in Unterkapitel 3.7 verwendete Methode angewandt. Dabei wird die Förderhöhe in mehreren Schritten abgesenkt und die sich daraus ergebenden jährlichen Energieeinsparungen ermittelt. Über die in Unterkapitel 3.8.1 beschriebene Kapitalwertmethode wird aus den Energieeinsparungen der Förderhöhenabsenkung der Kapitalwert (Barwert) der Energieeinsparungen berechnet.

Dieser gibt an, wie hoch eine Investition in vorzeitige Rohrsanierungsmaßnahmen sein darf, sodass diese von den sich jährlich ergebenden Kosteneinsparungen eines verminderten Pumpenenergieeinsatzes gedeckt werden. Über die betriebsspezifischen Rohrsanierungskosten von 300 €/m (ENTEGA 2015) kann in Abhängigkeit der Förderhöhenabsenkung die Länge der zu sanierenden Rohrleitungen ermittelt werden, die nicht überschritten werden darf, um die Investition durch die Energieeinsparung zu decken.

Im Anschluss wird das Rechnetzmodell mit Hilfe des Netzberechnungsprogramms STANET auf einzelne Rohrleitungen hin untersucht, in denen überdurchschnittlich hohe Druckverluste anfallen. Um das Rechnetzmodell hinsichtlich der Druckverluste zu untersuchen, muss ein Lastfall aus dem für die MZ_{SOLL} zu erstellenden Lastprofil ausgewählt werden. Der Lastfall muss die durchschnittlichen Netzbedingungen wiedergeben, damit die auftretenden Druckverluste für den späteren Betrieb nicht über- oder unterbewertet werden. Die Auswahl erfolgt anhand der Häufigkeit des auftretenden Lastfalls und dem Beitrag des Lastfalls zur Ausbildung des Jahresenergiebedarfs, der zu Versorgung der MZ_{SOLL} notwendig ist. Die Druckverluste werden mit Hilfe des ausgewählten Lastfalls simuliert. Rohrleitungen mit hohen Druckverlusten werden ausgewählt und in den Zustand neuer Rohrleitungen verbracht. Dazu werden die Rauigkeitsbeiwerte der ausgewählte Rohrleitungen auf das Niveau neuer Leitungen herabgesetzt. Weiterhin werden einzelne Leitungen, in denen die hohen Druckverluste aus hohen Fließgeschwindigkeiten resultieren, im Durchmesser vergrößert.

Abschließend werden die Fließverhältnisse für das so modifizierte Netzmodell simuliert und die Druckhöhe am kritischen Knotenpunkt mit der Druckhöhe aus der Simulation des unveränderten Netzmodells verglichen. Die Fließverhältnisse des modifizierten Netzmodells werden dann als verbessert angesehen, wenn die damit ermittelte Druckhöhe um die in Unterkapitel 3.6.1 beschriebene Genauigkeit von +2 % des $p_{ruh,max}$ höher liegt, als die Druckhöhe des ursprünglichen Netzmodells.

Die Investition gilt dann als lohnend, wenn Rohrleitungen ermittelt werden können, durch deren Sanierung die Förderhöhe soweit abgesenkt werden kann, dass die resultierenden Energieeinsparungen die Investition in die zu sanierenden Rohrleitungen decken.

4. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse dieser Arbeit vorgestellt. In Unterkapitel 4.1 werden die im Jahr 2013 in die HZs geförderten Wassermengen, der für das Jahr 2013 zur Versorgung der einzelnen HZs ermittelte Energiebedarf sowie der sich aus diesen beiden Größen ergebende spezifische Energiebedarf der HZs dargestellt. Weiterhin wird aufgezeigt, für welche HZs und DEAs die Plausibilität der ermittelten Förder- und Energiemengen gegeben ist und für welche HZs und DEAs Abweichungen von den erwarteten Mengen vorliegen.

In Unterkapitel 4.2 wird das aus den Fördermengen der HZs 2a und 3a extrapolierte Lastprofil vorgestellt und das dem Lastprofil zu Grunde gelegte Jahr 2013 in den üblichen Wasserverbrauch der Stadt Darmstadt eingeordnet. Das Lastprofil liefert die nach Formel 3.11 zur Berechnung des elektrischen Energiebedarfs der MZ_{SOLL} benötigten, in fünf Klassen eingeteilten Förderströme Q und die dazugehörigen Jahresbetriebsstunden t . Danach folgt eine Einordnung der dem Lastprofil zugrunde gelegten Fördermenge in den üblichen Wasserverbrauch der Stadt Darmstadt

Ausgehend von den im Lastprofil erstellten Klassen werden die Gesamtwirkungsgrade η_G der DEAs OETI und HEIN ermittelt. Die Gesamtwirkungsgrade werden zusammen mit den notwendigen Zwischenergebnissen in Unterkapitel 4.3 vorgestellt. Des Weiteren erfolgt die Vorstellung der Gesamtwirkungsgrade der Grundlastanlage DEA MATH.

In Unterkapitel 4.4 werden die Ergebnisse und die im Rechnetzmodell vorgenommenen Veränderungen vorgestellt, die über die Simulationen die Förderhöhe H beeinflussen. Danach wird gezeigt, warum den DEAs jeweils der gleiche Vordruck zugeordnet wird und wie die durch den Pumpenbetrieb niederzonenseitig entstehenden Druckverluste in den Simulationen berücksichtigt werden.

Mit Hilfe der Förderströme Q , den Jahresbetriebsstunden t , den Gesamtwirkungsgraden η_G sowie den Förderhöhen H wird der elektrische Energiebedarf der MZ_{SOLL} berechnet. In Unterkapitel 4.5 werden die Ergebnisse dazu vorgestellt. Der elektrische Energiebedarf unterschiedlicher Pumpensteuerungen wird in verschiedenen Abbildungen dargestellt und basierend darauf werden Empfehlungen zur energieeffizienten Pumpensteuerung gegeben. Abschließend wird das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse vorgestellt. Mit dieser wird die Auswirkung eines Pumpenbetriebs in schlechten Pumpenwirkungsgradbereichen auf die Entwicklung des Energiebedarfs bestimmt.

In Unterkapitel 4.6 wird anhand der Ergebnisse der Investitionsrechnung gezeigt, wie hoch die jährliche Vermögensänderung des WVUs ausfällt, wenn in die Sanierung der DEA MATH investiert wird. Das Ergebnis der dazu durchgeführten Sensitivitätsanalysen zeigt, wie die ermittelte jährliche Vermögensänderung auf eine Strompreissteigerung und die im Rechnetzmodell innewohnenden Ungenauigkeiten reagiert.

In Unterkapitel 4.7 wird aufgezeigt, ob für das vorliegende Netz ein Optimierungspotenzial in Bezug auf einen vorgezogenen Austausch von Leitungen zur Reduktion von Druckverlusten vorliegt. Dabei sollen Rohrleitungen identifiziert werden, deren Sanierung die dort auftretenden Druckverluste soweit verringern würde, dass sich die vorgezogene Investition in die Sanierung durch die Einsparung von Pumpenergie amortisiert.

4.1. Elektrischer Energiebedarf ALT-Zustand

In diesem Unterkapitel werden die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt, die im Zusammenhang mit der Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs des ALT-Zustandes stehen. Zuerst werden die im Jahr 2013 in die HZs geförderten Wassermengen dargestellt. Darauf folgt die Darstellung des im Jahr 2013 zur Versorgung der einzelnen HZs ermittelten Energiebedarfs. Aus diesen beiden Größen ergibt sich für die einzelnen HZs jeweils der spezifische Energiebedarf, der im Jahr 2013 zur Versorgung dieser HZs benötigt wurde. Dort wird dargelegt, dass die Ergebnisse die vom WVU aufgestellte These, die Stilllegung der DMAs verringere die zur Versorgung der HZs benötigte Energie, unterstützen. Im Text aufgeführte Ergebnisse werden auf 1.000 m³ bzw. 500 kWh gerundet. Im Anschluss daran folgen die Ergebnisse der Plausibilitätsprüfungen in Bezug auf die ermittelten Fördermengen sowie den berechneten Energiebedarf der HZs und DEAs.

Die in diesem Unterkapitel in Abbildungen dargestellten Ergebnisse betreffen vor allem die HZs und basieren auf den im Anhang ab S. XLIII aufgeführten Tabellen. Dort werden die Ergebnisse sämtlicher in Unterkapitel 3.2 beschriebener Berechnungen dargestellt. Darunter fallen auch hier nicht aufgeführte Ergebnisse, wie die für das Jahr 2013 ermittelten Fördermengen, Energiebedarf und spezifischer Energiebedarf der einzelnen DEAs.

4.1.1. Fördermengen und Energiebedarf zur Versorgung der HZs im Jahr 2013

In Abbildung 11 werden die im Jahr 2013 in die HZs geförderten Wassermengen dargestellt. Insgesamt wurden im Jahr 2013 ca. 1,8 Mio. m³ Wasser in die HZs gefördert. Darunter entfallen 730.000 m³ auf die HZ2a, 590.000 m³ auf die HZ3a und 490.000 m³ auf die MZ. Mit ca. 37.000 m³ betragen die in die HZ3b geförderten Wassermengen lediglich rund 2 % des Gesamtaufkommens der vier von der Zusammenlegung betroffenen HZs. Mit 24.000 m³ werden rund 4 % des in die HZ3a geförderten Wassers über das ÜSV HEIH direkt wieder in die NZ ausgespeist.

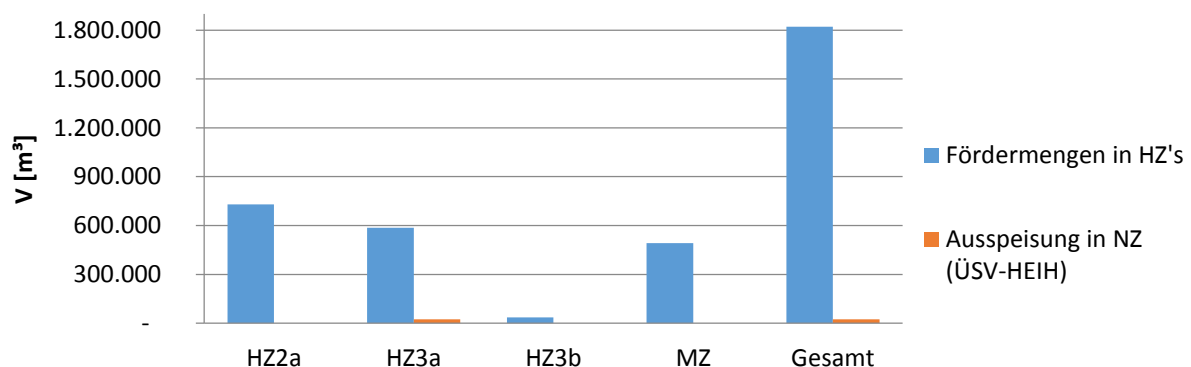


Abbildung 11: Darstellung der im Jahr 2013 in die HZs geförderten Wassermengen

In Abbildung 12 wird der im Jahr 2013 zur Versorgung der einzelnen HZs ermittelte Energiebedarf dargestellt. Insgesamt wurden im Jahr 2013 ca. 480.000 kWh elektrischer Energie zur Versorgung der HZs benötigt. Mit 238.500 kWh entfallen ca. 50 % des zur Versorgung der HZs anfallenden Energiebedarfs auf die Versorgung der HZ2a. Weiterhin entfallen auf die Versorgung der MZ_{ALT} 92.000 kWh sowie auf die HZ3b 12.000 kWh. Auf die Versorgung der HZ3a entfallen 137.500 kWh. Das aus dem ÜSV HEIH in die NZ ausgespeiste Wasser hat einen Anteil von 4 % an der in die HZ3a geförderten Wassermenge. Damit werden 5.500 kWh allein zur Überdruckregulation aufgewendet.

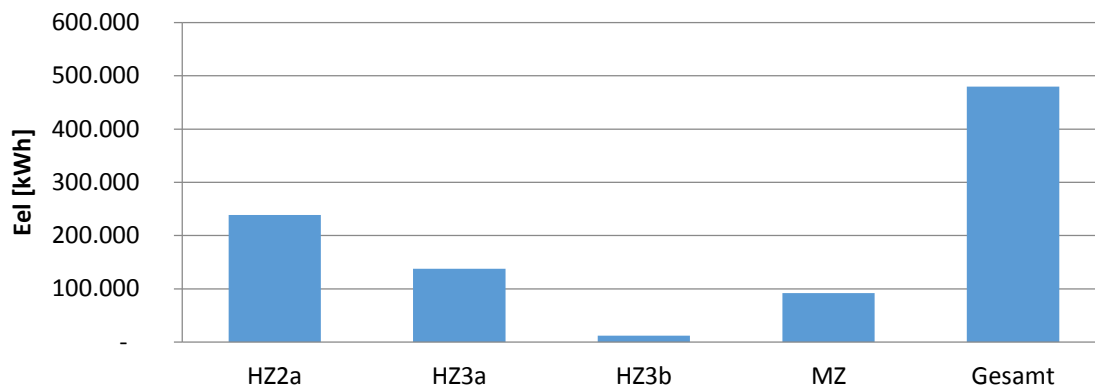


Abbildung 12: Darstellung des im Jahr 2013 zur Versorgung der einzelnen HZs ermittelten Energiebedarfs

In Abbildung 13 wird der zur Versorgung der einzelnen HZs im Jahre 2013 benötigte spezifische Energiebedarf dargestellt. Durchschnittlich wurden zur Versorgung der HZs 0,26 kWh/m³ benötigt. Da die HZs 2a und 3b jeweils ausschließlich über die HZ1 versorgt werden, ergibt sich für beide der gleiche spezifische Energiebedarf von jeweils 0,33 kWh/m³. Der spezifische Energiebedarf zur Versorgung der HZ3a beträgt 0,23 kWh/m³, der zur Versorgung der MZ_{ALT} 0,19 kWh/m³.

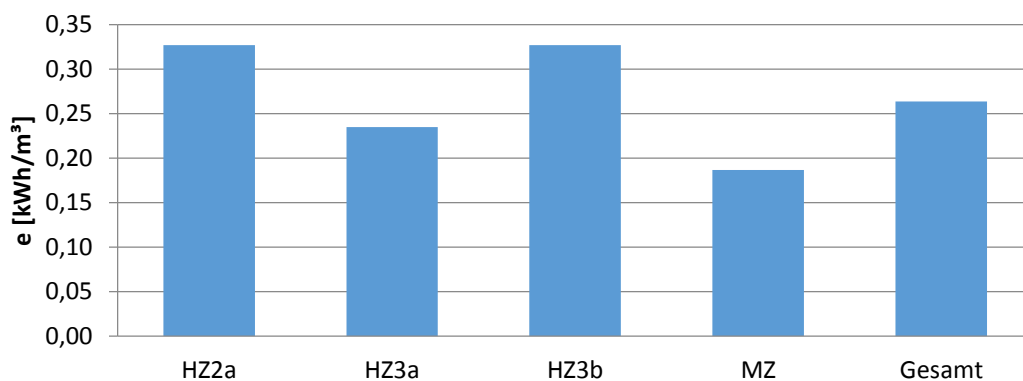


Abbildung 13: Darstellung des im Jahr 2013 zur Versorgung der einzelnen HZs ermittelten spezifischen Energiebedarfs

Zur Versorgung der HZ3a wird somit 30 % weniger Energie pro gefördertem Volumen benötigt, als zu Versorgung der auf ähnlicher Druckhöhe liegenden HZ2a aufgewendet werden muss. Die HZ3a wird dabei zu 70 % über die DEAs OBER und MATH aus der NZ versorgt, während die Versorgung der HZ2a ausschließlich über DMAs aus der HZ1 sichergestellt wird. Dies unterstützt die vom WVU aufgestellte These, dass allein durch die Einsparung der DMAs Energie eingespart wird.

4.1.2. Plausibilitätsprüfung

Es folgen die Ergebnisse der Plausibilitätsprüfungen zu den ermittelten Fördermengen und dem zum Teil aus Extrapolationen ermittelten Energiebedarf.

Fördermengen

In Tabelle 2 wird die Differenz zwischen den im Jahr 2013 in die HZs geförderten und den dort im Jahr 2012 verbrauchten Mengen dargestellt. Die Werte zum Wasserverbrauch 2012 sind mit 3 % Verlusten beaufschlagt. Bei der Differenzbildung wird die aus dem ÜSV HEIH aus der HZ3a in die NZ ausgespeiste Menge berücksichtigt.

Unter Berücksichtigung der vom WVU angegebenen Wasserverluste wurden in die HZ2a und MZ_{ALT} 2013 2 % bzw. 3 % mehr Wasser gefördert, als im Jahr 2012 verbraucht wurde. In den gleichen Zeiträumen wurde in die HZ3a 10 % mehr gefördert als verbraucht. Insgesamt wurden in die betrachteten HZs im Jahr 2013 5 % mehr Wasser gefördert, als im Jahr 2012 verbraucht wurde.

Tabelle 2: Differenz zwischen den im Jahr 2013 in die HZs geförderten und den dort im Jahr 2012 verbrauchten Mengen

Hochzonen	Fördermenge 2013 [m³]	Wasserverbrauch 2012 ⁽¹⁾ [m³]	Differenz [%]
HZ2a	730.061	713.486	2
HZ3a	585.875	508.458	10
(davon ÜSV HEIH)	23.956	-	-
HZ3b	-	36.921	-
MZ _{ALT}	491.869	477.201	3
Gesamt	1.820.769	1.736.067	5
Bemerkung:	⁽¹⁾ incl. 3 % Verluste		

In Tabelle 3 werden die Differenzen zwischen der Wasserabgabe an Haushalte und Kleingewerbe der umliegenden Gemeinden aus den Jahren 2012 und 2013 dargestellt. Negative Werte zeigen einen höheren Verbrauch im Jahr 2012, positive Werte einen höheren Verbrauch im Jahr 2013 an.

Die Schwankungsbreite reicht von -2 bis +3 %. Insgesamt wurde in den umliegenden Gemeinden im Jahr 2013 1 % mehr Wasser verbraucht als im Jahr 2012.

Tabelle 3: Differenzen zwischen der Wasserabgabe an Haushalte und Kleingewerbe der umliegenden Gemeinden aus den Jahren 2012 und 2013

Gemeinde	Abgabemenge 2013 [m³]	Abgabemenge 2012 [m³]	Differenz [%]
Erzhausen	301.446	293.352	3
Weiterstadt	1.094.279	1.092.909	0
Biebesheim	276.475	283.266	-2
Riedstadt	839.364	815.690	3
Stockstadt	219.166	214.785	2
Gesamt	2.730.730	2.700.002	1

Als Ergebnis der Plausibilitätsprüfung der Fördermengen wird festgehalten, dass eine jahresbedingte Schwankung von 2 bis 3 % zwischen den Jahren 2012 und 2013 innerhalb einer Zone als plausibel angesehen werden kann. Die in Tabelle 3 dargestellten Differenzen zwischen den Abgabemengen 2012 und 2013 innerhalb der Gemeinden lassen diese Aussage zu. Somit werden die Fördermengen der HZ 2a und MZ_{ALT} als plausibel angesehen. Dies sind 67 % der Gesamtfördermenge. Der von 2012 auf 2013 um 10 % angestiegene Verbrauch in der HZ3a kann durch die Plausibilitätsprüfung nicht erklärt werden.

Energiebedarf

In Tabelle 4 wird die Differenz zwischen dem für den Pumpenbetrieb ermittelten und dem vom Versorger in Rechnung gestellten Energiebedarf der DEAs aus dem Jahre 2013 dargestellt. Negative Werte zeigen an, dass mehr Energie für den Betrieb der DEAs in Rechnung gestellt als durch den Betrieb der Pumpen verbraucht wurde. Die Abrechnung für den Betrieb der DEA OBER weist einen um 24 % höheren Energieverbrauch auf, als durch den Betrieb der dortigen Pumpen verbraucht wurde. Insgesamt wurde für den Betrieb der DEAs im Jahr 2013 2 % mehr Energie in Rechnung gestellt als für den Betrieb der Pumpen verbraucht wurde.

Tabelle 4: Differenz zwischen dem ermittelten und dem vom Versorger in Rechnung gestellten Energiebedarf der DEAs aus dem Jahre 2013.

DEA	E _{el} Pumpen 2013 [kWh]	E _{el} Abrechnung 2013 [kWh]	Differenz [%]
MATH	72.451	k.A.	-
MARI	341.023	341.290	0
HEIN HZ1 + MZ	350.224	355.332	-1
OBER	22.726	28.228	-24
Gesamt	713.973	724.850	-2

Als Ergebnis der Plausibilitätsprüfung wird der zum Teil aus Extrapolationen ermittelte Energiebedarf der DEAs MARI sowie HEIN HZ1+MZ für diese Arbeit als ausreichend genau eingestuft. Es ergeben sich Abweichungen von bis zu 1 % zwischen dem ermittelten und dem vom Versorger in Rechnung gestellten Energiebedarf der DEAs aus dem Jahre 2013.

Eine Plausibilitätsprüfung des Energiebedarfs der DEA MATH kann nicht vorgenommen werden, da in der Betriebsstätte kein Stromzähler des Energieversorgers vorhanden ist.

Des Weiteren ist eine aussagekräftige Bewertung der Plausibilitätsprüfung der DEA OBER nicht möglich. In Unterkapitel 3.2.3 wird aufgeführt, dass die DEA OBER in der Betriebsstätte HB OBER integriert ist und der Energieverbrauch weitere Stromverbraucher (z.B. Luftentfeuchtungsanlage) über die Zähleranlagen des Energieversorgers abgerechnet werden. Der Anteil des Energiebedarfs der DEA OBER an der in Rechnung gestellten Energiemenge kann deshalb nicht ermittelt werden.

4.2. Lastprofil

In diesem Unterkapitel wird das aus den Fördermengen der HZs 2a und 3a extrapolierte Lastprofil vorgestellt. Darauf folgt die Einordnung der für das Lastprofil zugrunde gelegten Fördermenge in den üblichen Wasserverbrauch der Stadt Darmstadt.

4.2.1. Ergebnisse der Extrapolation zur Erstellung des Lastprofils

Die Extrapolation wird durchgeführt, um das zukünftige Lastprofil der MZ_{SOLL} zu ermitteln. Die MZ_{SOLL} setzt sich aus den HZs 2a, 3a und 3b sowie der MZ_{ALT} zusammen. Für die Extrapolation liegen verwertbare Stundenwerte der Fördermengen der HZs 2a und 3a aus dem Jahr 2013 vor. Zusammen bilden diese Stundenwerte 67 % des Verbrauchs der Zonen, die die zukünftige MZ_{SOLL} umfassen. Im Folgenden wird diese Extrapolation „Extrapolation 2013“ genannt.

Die aus den Stundenwerten der Extrapolation 2013 ermittelten Fördermengen werden in 5 Klassen mit einer Klassenbreite von $100 \text{ m}^3/\text{h}$ angelegt. Es konnten keine Stundenwerte unter $Q = 25 \text{ m}^3/\text{h}$ festgestellt werden. Die erste Klasse beginnt deshalb bei $Q = 25 \text{ m}^3/\text{h}$ und endet bei $Q = 125 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Klassenmitte liegt bei $Q = 75 \text{ m}^3/\text{h}$. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt. Drei von 8.760 Stundenwerten sind größer als $525 \text{ m}^3/\text{h}$ und werden als Ausreißer nicht weiter beachtet. K-OG und K-Mitte bezeichnen die Klassenobergrenzen und -mitten. F steht für die kumulierten Klassenhäufigkeiten, f für die Klassenhäufigkeiten.

Tabelle 5: MZ_{SOLL} extrapoliert aus HZ2a + 3a 2013

K-OG [m³/h]	K-Mitte [m³/h]	F [-]	f [-]	f [%]
125	75	1.499	1.499	17,11
225	175	4.163	2.664	30,41
325	275	7.683	3.520	40,18
425	375	8.712	1.029	11,75
525	475	8.757	45	0,51
		Summe	8.757	99,97

Die klassifizierten Förderströme werden in Abbildung 14 als Lastprofil der MZ_{SOLL} dargestellt.

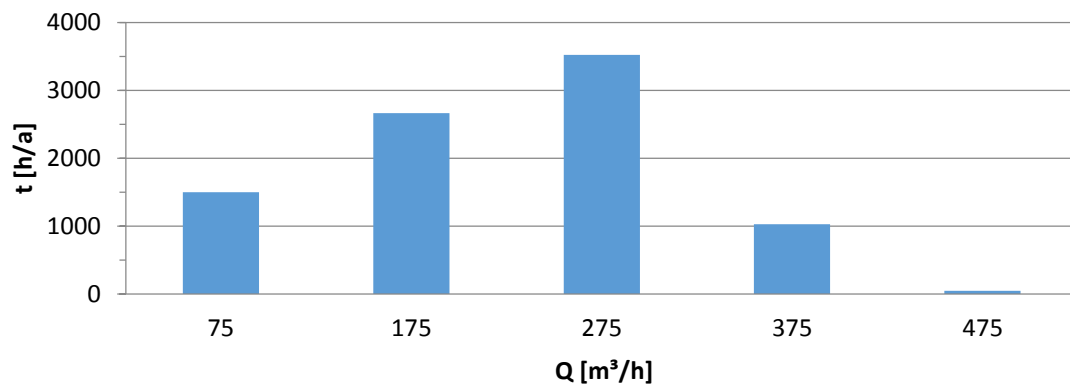


Abbildung 14: Lastprofil der MZ_{SOLL} extrapoliert aus den Förderströmen der HZs 2a+3a aus dem Jahre 2013

4.2.2. Einordnung der Jahresfördermenge 2013 in den üblichen Wasserverbrauch der Stadt Darmstadt

Um einen Eindruck darüber zu bekommen, ob die für das Lastprofil der MZ_{SOLL} zugrunde gelegten Fördermengen 2013 aus einem verbrauchsarmen oder verbrauchsstarken Jahr stammen, werden in Tabelle 6 seit der Jahrtausendwende veröffentlichte Daten zur Wasserabgabe der Stadt Darmstadt gegenübergestellt. Da die Verbraucherstruktur der MZ_{SOLL} durch Haushalte und Kleingewerbe dominiert wird (ENTEKA 2015), werden bei der Gegenüberstellung nur diese Abgabemengen berücksichtigt.

Tabelle 6 zeigt, dass die Entwicklung der Wasserabgabe vor dem Hintergrund stetig steigender Einwohnerzahlen verläuft. Im Jahr 2001 beträgt die Wasserabgabe 6,5 Mio. m³. Das ist im Vergleich zu den anderen vier betrachteten Jahren der niedrigste Wert. Im Jahr 2004 ist die Wasserabgabe mit 7,7 Mio. m³ am höchsten. Die Wasserabgabe im Jahr 2013, auf dessen Fördermengen das Lastprofil basiert, beträgt 7,1 Mio. m³. Das sind 8 % weniger als im Jahr 2004 und 9 % mehr als im Jahr 2001. Die Wasserabgabe der Jahre 2007 und 2010 liegt mit 6,8 und 6,9 Mio. m³ unter der Wasserabgabe des Jahres 2013. Wird aus diesen fünf Jahren ein Durchschnittswert gebildet, liegt die Wasserabgabe mit 7,1 Mio. m³ ca. 1 % über dem Durchschnitt von 7 Mio. m³. In der Gesamtbetrachtung wird das Jahr 2013 deshalb als verbrauchsstarkes Jahr eingestuft.

Tabelle 6: Seit der Jahrtausendwende veröffentlichte Daten zur Wasserabgabe der Haushalte und Kleingewerbe der Stadt Darmstadt (Jahre 2001 - 2010 aus: Wissenschaftsstadt Darmstadt 2015, Kapitel 12.14; Jahr 2013 aus: Hessisches Statistisches Landesamt 2015)

Jahr	Wasserabgabe [m³]	Einwohner
2001	6.496.000	138.457
2004	7.738.000	140.078
2007	6.827.000	141.471
2010	6.880.000	143.222
2013	7.094.000	148.483

4.3. Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse vorgestellt, die zur Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade der DEAs OETI, HEIN und MATH führen. Zuerst wird der nach den Formeln 3.14 und 3.15 ermittelte Zusammenhang zwischen den gemessenen Gesamtwirkungsgraden $\eta_{G,mess}$ und den Pumpenwirkungsgraden η_{Pu} über die Funktion $f(Q)$ dargestellt. Über diese Funktion werden die Gesamtwirkungsgrade η_G der DEAs HEIN und OETI ermittelt. Abschließend erfolgt die Vorstellung der Gesamtwirkungsgrade der Grundlastanlage DEA MATH.

4.3.1. Funktion $f(Q)$ und Gesamtwirkungsgrade der DEAs OETI und HEIN

Aus den in der Leistungsmessung vom 09.12.2014 ermittelten Gesamtwirkungsgraden $\eta_{G,mess}$ und den Pumpenwirkungsgraden η_{Pu} des Pumpenherstellers werden nach der Funktion $f(Q)$ die Wirkungsgradverhältnisse $\eta_{G,mess}/\eta_{Pu}$ gebildet. Diese sind in Tabelle 7 aufgelistet.

Tabelle 7: Gemessene Gesamtwirkungsgrade, dazugehörige Pumpenwirkungsgrade und Wirkungsgradverhältnis

Pumpen	Förderstrom [m ³ /h]	$\eta_{G,mess}$ [%]	η_{Pu} [%]	$\eta_{G,mess}/\eta_{Pu}$ [%]
1	75	68,3	75,7	90,3
2	115	62,8	71,6	87,7
2	175	67,9	76,2	89,1
3	220	66,3	74,8	88,6
3	270	67,5	76,4	88,4
4	340	66,5	76,4	87,1

Aus dem Wirkungsgradverhältnis $\eta_{G,mess}/\eta_{Pu}$ ergibt sich die Funktion $f(Q)$, die in Abbildung 15 dargestellt wird. In der Funktion werden fünf der sechs gemessenen Gesamtwirkungsgrade über das Wirkungsgradverhältnis berücksichtigt. Das Wirkungsgradverhältnis bei $Q = 115 \text{ m}^3/\text{h}$ bleibt als Ausreißer unberücksichtigt. Aufgrund des Funktionsverlaufs wird die Funktion in den Bereichen von 75 bis 425 m³/h als linear angenommen.

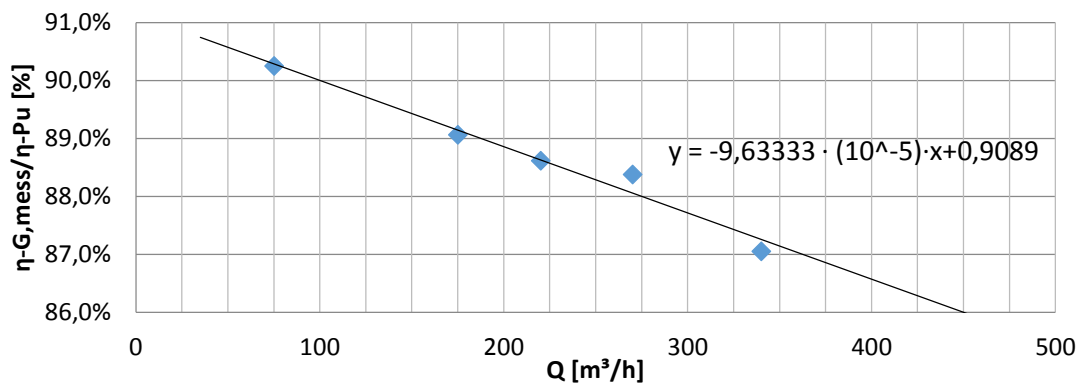


Abbildung 15: Funktion $f(Q)$ als Verhältnis von gemessenem Gesamtwirkungsgrad zum Pumpenwirkungsgrad in Abhängigkeit des Förderstroms

Über diese Funktion können die bei der Berechnung des Energiebedarfs und der Auswahl der Pumpensteuerung der MZ_{SOLL} benötigten Gesamtwirkungsgrade der DEAs HEIN und OETI je nach Förderstrom berechnet werden. Im Anhang auf S. XXXII in Tabelle 20 sind alle im weiteren Verlauf ab Unterkapitel 4.5 benötigten Gesamtwirkungsgrade aufgeführt.

4.3.2. Gesamtwirkungsgrade der DEA MATH

Die Ermittlung der Gesamtwirkungsgrade der DEA MATH unterscheidet sich zum vorherigen Vorgehen in zwei Dingen. Zum einen ist die DEA nicht drehzahl geregelt und besitzt damit keinen FU. Deshalb wird der Wirkungsgrad des FU η_{FU} bei der Ermittlung des Gesamtwirkungsgrades η_G herausgerechnet. Zum anderen kann eine Auswahl der Pumpenkonfiguration unter energetischen Gesichtspunkten getroffen werden. Aus den Aufführungen im Anhang ab S. XXVIII ergibt sich der für die DEA MATH angenommene Pumpenwirkungsgrad von $\eta_{Pu} = 79 \%$.

Über die Funktion $f(Q)$ werden unter Berücksichtigung des Pumpenwirkungsgrads und des Fehlens eines FUs die Gesamtwirkungsgrade der DEA MATH berechnet. Diese sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Ermittelte Gesamtwirkungsgrade und Wirkungsgradverhältnisse der DEA MATH

Pumpen	Förderstrom [m³/h]	η_{Pu} [%]	η_G/η_{Pu} [%]	η_{FU} [%]	η_G [%]
1	90	79,0	90,0	98,0	72,6
2	180	79,0	89,2	98,0	71,9

4.4. STANET

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse vorgestellt, die die Simulationen in STANET betreffen und damit bei der Berechnung des Energiebedarfs der MZ_{SOLL} einen Einfluss auf die Förderhöhe nehmen. Zuerst wird die Genauigkeit der Simulationsergebnisse ermittelt. Diese ergibt sich aus der Kalibrierung des Rechnernetzmodells. Danach werden die Ergebnisse zur Vordrucksituation der DEAs aufgeführt. Darunter fallen die Ergebnisse der Vordruckanalyse, die zum Ziel hat, jeder DEA einen zu erwartenden, durchschnittlichen Vordruck zuzuordnen. Abschließend wird dargelegt, wie viele Meter Rohrleitung im Rechnernetzmodell zwischen den Druckknoten und den Pumpen der DEAs verlegt werden müssen, um die während des Pumpenbetriebs entstehenden niederzonenseitigen Druckverluste in den Simulationen zu berücksichtigen.

4.4.1. Kalibrierung des Rechnernetzmodells und Genauigkeit der Simulationen

Der Ort mit dem maximalen Ruhedruck im Netz liegt im Westen der HZ2a in der Brüder-Knauß-Straße. Diese liegt auf einer geodätischen Höhe von 143 m. Die Ruhedruckhöhe von 220 m wird durch die Solldruckeinstellung der drei die HZ2a versorgenden DMAs vorgegeben. Es ergibt sich ein Ruhedruck von 80 m bzw. 7,85 bar. Das Rechnernetzmodell ist auf eine maximale Abweichung der errechneten von den gemessenen Ruhedrücken von 2 % kalibriert. Es ergibt sich eine maximal zulässige Abweichung von $\pm 0,157$ bar bzw. $\pm 1,6$ m. Deshalb wird davon ausgegangen, dass die Simulationsergebnisse in Bezug auf den Druck auf $\pm 1,6$ m genau sind.

4.4.2. Vordruckanalyse: Ermittlung der in STANET angesetzten Vordrücke

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus dem Vergleich der gemessenen Vordrücke unter Variation der Einflussfaktoren Tageszeit, Verhalten des HB OBER sowie Förderzustand der betrachteten DEAs in einer Zusammenfassung vorgestellt. Im Anhang ab S.XXXIII werden die Ergebnisse aus der Analyse der Messreihen im Detail wiedergegeben. Die dazu ausgewählten Messreihen werden im Anhang in Tabelle 21 dargestellt.

Der Vergleich der Vordrücke vor den DEAs HEIN HZ1 und HEIN MZ bestätigt die Annahme, dass die Fehlertoleranz der Druckmesser im vom Hersteller angegebenen Bereich von 0,5 m liegt.

Der Behälterwasserstand liegt im Durchschnitt bei 3 m. Zuzüglich der Behälterhöhe von 182 m ergibt sich dort eine durchschnittliche Druckhöhe von 185 m.

Der Vergleich der Druckhöhen vor den DEAs während der verbrauchsarmen Nachtzeit zeigt, dass die gemessenen Drücke nicht plausibel sind. Für das weitere Vorgehen wird angenommen, dass der an den Druckmessern vorliegende Fehler konstant bleibt und die zwischen den Messreihen ermittelten Druckschwankungen innerhalb der Fehlertoleranz von 0,5 m genau bleiben. Die getroffene Annahme ergibt sich aus der in Unterkapitel 10 im Anhang auf S.XL geführten Diskussion.

Die Analyse der Messreihen weist darauf hin, dass der Vordruck einer DEA abhängig von der Tageszeit, dem Hochbehälterwasserstand, sowie dem Förderzustand der betrachteten DEA ist. Es gibt dagegen keine Hinweise darauf, dass der Zu- oder Abfluss in oder aus dem HB OBER Auswirkungen auf den Vordruck der DEAs hat. Für die Vordruckhöhen der ausgewählten Messreihen gilt, dass die Tageszeit und der Förderzustand einer DEA einen zusätzlich Einfluss auf die Ausbildung unterschiedlicher Vordruckhöhen vor den DEAs hat. Wird eine DEA betrieben, sinkt der Vordruck unmittelbar vor der Anlage. Unabhängig vom Förderzustand der einzelnen DEA sinkt der Vordruck der DEA HEIN zur Mittagszeit stärker, als die Vordrücke der DEA MATH und OETI. Dieses verstärkte Absinken kann nicht genauer quantifiziert werden. Aus den Messwerten geht hervor, dass der Vordruck der DEA HEIN während der Mittagszeit im Vergleich zu den Vordrücken der DEAs MATH und OETI zwischen 0,3 und 2,4 m stärker absinkt.

Die Gesamtbetrachtung dieser Ergebnisse zeigt, dass die einzelne Bestimmung eines Durchschnittswertes für den Vordruck jeder DEA aus den vorliegenden Daten nicht sinnvoll ist. Ein Grund dafür ist, dass die Vordrücke von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst werden, die die Bildung eines Durchschnittswerts für jede DEA erschweren. Um keine ungerechtfertigten Unterschiede im Vordruck der DEAs zu simulieren, werden für die weiteren Berechnungen die Vordrücke für alle drei DEAs aus dem beim HB OBER im Durchschnitt anstehenden Vordruck ermittelt. Die durchschnittliche Druckhöhe am Auslass des HB OBER beträgt 185 m. In Tabelle 9 werden die für die Simulationen ins Rechnetzmodell übernommenen Vordrücke der DEAs aufgelistet.

Tabelle 9: Für die Simulationen verwendete Vordrücke

Anlage	Druckhöhe [m]	geodätische Höhe [m]	Vordruck [bar]
DEA HEIN	185	165,4	1,92
DEA MATH	185	173	1,18
DEA OETI	185	145,6	3,87

4.4.3. Berücksichtigung der niederzonenseitigen Druckverluste

Um die durch den Betrieb der DEAs niederzonenseitig entstehenden Druckverluste in den Simulationen zu berücksichtigen, werden die Vordruckhöhen der DEA HEIN HZ1 zu unterschiedlichen Förderzuständen verglichen. Die DEA HEIN HZ1 sorgt mit einem Förderstrom von 400 m³/h als einzige DEA für eine nennenswerte Vordruckabsenkung und liefert deshalb auch die besten Ergebnisse. Im Vergleich dazu förderte die DEA OETI im betrachteten Zeitraum maximal 80 m³/h. Die Messreihen lassen für diesen Fall keine Vordruckabsenkung erkennen. Im Anhang ab S.XXXIX werden die Ergebnisse aus der Analyse der Messreihen im Detail wiedergegeben. Die dazu ausgewählten Messreihen werden im Anhang in Tabelle 21 dargestellt.

Die Analyse der ausgewählten Messreihen ergibt, dass der Vordruck der DEA HEIN HZ1 durch den Betrieb der Pumpen bei einem Förderstrom von 400 m³/h um ca. 2,5 m im Vergleich zum Ruhedruck abgesenkt wird. Um den niederzonenseitigen Druckabfall auch an den DEAs MATH und OETI berücksichtigen zu können, wird bei den Simulationen angenommen, dass der Vordruck vor den DEAs MATH und OETI bei gleichem Förderstrom in gleicher Weise sinkt wie bei der DEA HEIN HZ1. Um in den Simulationen Druckverluste zwischen den Druckknoten und Pumpen der DEAs von 2,5 m bei einem Förderstrom von 400 m³/h zu erzeugen, müssen in Rechenetzmodell jeweils 810 m Rohrleitung der in Unterkapitel 3.6.2 vorgegebenen Dimensionierung (Grauguss; DN 400; Rauigkeit 2 mm) integriert werden.

4.5. Elektrischer Energiebedarf SOLL-Zustand und Pumpensteuerung

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse aus der Ermittlung des elektrischen Energiebedarfs des SOLL-Zustandes und der Pumpensteuerung vorgestellt. Um eine energetisch günstige Pumpensteuerung zu ermitteln, wird der elektrische Energiebedarf für unterschiedliche Pumpensteuerungen berechnet. Die Ergebnisse werden im Folgenden als Abbildungen dargestellt. Im Text aufgeführte Ergebnisse werden auf 500 kWh gerundet. Im Anhang ab S. XLIV finden sich die Ergebnisse, auf denen die Abbildungen basieren, in Tabellen wieder.

Zunächst wird das Ergebnis aus dem Vergleich des Jahresenergiebedarfs der DEAs HEIN und OETI vorgestellt. Es wird dargelegt, dass keine der beiden DEAs wesentliche Vorteile bei einer alleinigen Versorgung der MZ_{SOLL} gegenüber der anderen hat. Danach erfolgt die detaillierte Gegenüberstellung des ermittelten Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen. Dazu wird der Jahresenergiebedarf für jeden der fünf im Lastprofil klassifizierten Förderströme zwischen den Pumpensteuerungen verglichen. Die Pumpensteuerungen stellen die Möglichkeiten zur Aufteilung des zur Versorgung der MZ_{SOLL} benötigten Förderstroms auf die unterschiedlichen DEAs dar. In Tabelle 10 werden die Pumpensteuerungen und die im weiteren Verlauf verwendeten Abkürzungen erläutert.

Anschließend wird aus dem ermittelten Jahresenergiebedarf der unterschiedlichen Pumpensteuerungen eine Empfehlung zur Auswahl einer Pumpensteuerung gegeben. Dazu werden für jeden der fünf betrachteten Lastfälle diejenigen Pumpensteuerungen empfohlen, die jeweils den wesentlich geringsten Jahresenergiebedarf aufweisen.

Abschließend wird das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse vorgestellt. Dort wird der Jahresenergiebedarf der DEA HEIN unter Variation des Pumpenwirkungsgrades dem ursprünglich ermittelten Jahresenergiebedarf der DEA HEIN gegenübergestellt, um die Auswirkung eines Pumpenbetriebs in schlechten Pumpenwirkungsgradbereichen auf die Entwicklung des Energiebedarfs bestimmen zu können.

Im Anhang ab S. XLIX werden für jeden Lastfall die Strömungs- und Druckverhältnisse der MZ_{SOLL} bei einer Versorgung nach der Pumpensteuerung HEIN+OETI (η opt.) dargestellt.

Bevor die oben genannten Ergebnisse vorgestellt werden, werden die Hintergründe der in Tabelle 10 aufgeführten Pumpensteuerungen HEIN+OETI (η opt.) und HEIN+OETI (hyd opt.) beispielhaft erläutert.

Tabelle 10: Abkürzung und Erläuterung der verglichenen Pumpensteuerungen

Abkürzung	Pumpensteuerung
OETI	alleinige Versorgung durch DEA OETI
HEIN	alleinige Versorgung durch DEA HEIN
HEIN+OETI (η opt.)	Versorgung durch DEAs HEIN und OETI; Aufteilung des Förderstroms hinsichtlich optimaler Pumpenwirkungsgrade
HEIN+OETI (hyd opt.)	Versorgung durch DEAs HEIN und OETI; Aufteilung des Förderstroms zu gleichen Teilen, um Druckverluste zu minimieren
HEIN+OETI+MATH 90 (η opt.)	Versorgung durch DEAs HEIN, OETI und MATH; Zuschaltung einer Pumpe der DEA MATH, wenn $Q (M_{ZSOLL}) > 90 \text{ m}^3/\text{h}$; Aufteilung des restlichen Förderstroms hinsichtlich optimaler Pumpenwirkungsgrade
HEIN+OETI+MATH 180 (η opt.)	Versorgung durch DEAs HEIN, OETI und MATH; Zuschaltung einer Pumpe der DEA MATH, wenn $Q (M_{ZSOLL}) > 90 \text{ m}^3/\text{h}$; Zuschaltung einer zweiten Pumpe der DEA MATH, wenn $Q (M_{ZSOLL}) > 180 \text{ m}^3/\text{h}$; Aufteilung des restlichen Förderstroms hinsichtlich optimaler Pumpenwirkungsgrade

Unterschied der Pumpensteuerungen HEIN+OETI (η opt.) und HEIN+OETI (hyd opt.)

Der Unterschied zwischen den Pumpensteuerungen HEIN+OETI (η opt.) und HEIN+OETI (hyd opt.) liegt in der Aufteilung des Förderstroms. In der wirkungsgradoptimierten Pumpensteuerung HEIN+OETI (η opt.) werden die Förderströme jedes Lastfalls so aufgeteilt, dass für die Pumpen beider DEAs jeweils ein möglichst hoher Wirkungsgrad erzielt werden kann. Dies führt in manchen Fällen zu einer ungleichen Aufteilung der Förderströme auf die DEAs. Diese Aufteilung trifft z.B. für die Lastfälle $Q = 75 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q = 275 \text{ m}^3/\text{h}$ sowie $Q = 475 \text{ m}^3/\text{h}$ zu. Der Lastfall $Q = 75 \text{ m}^3/\text{h}$ wird durch den Betrieb einer Pumpe einer DEA abgedeckt, um bei dieser einen Pumpe einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Beim Lastfall $Q = 275 \text{ m}^3/\text{h}$ findet eine Aufteilung des Förderstroms auf beide DEAs statt, indem eine Pumpe einer DEA $90 \text{ m}^3/\text{h}$ und zwei Pumpen der anderen DEA $185 \text{ m}^3/\text{h}$ fördern. Zur Versorgung der M_{ZSOLL} beim Lastfall $Q = 475 \text{ m}^3/\text{h}$ wird im Vergleich zum Lastfall $Q = 275 \text{ m}^3/\text{h}$ in jeder DEA eine zusätzliche Pumpe zugeschaltet. Dieses Vorgehen optimiert den Wirkungsgrad der eingesetzten Pumpen, führt theoretisch aber insgesamt zu höheren Druckverlusten als bei der Pumpensteuerung HEIN+OETI (hyd opt.), bei der die Förderströme genau gleich auf die DEAs aufgeteilt werden. Die wird im Folgenden genauer erläutert.

Die ungleiche Aufteilung der Förderströme bei der Pumpensteuerung HEIN+OETI (η opt.) führt im Vergleich zu einer gleichen Aufteilung zu unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten hinter den DEAs.

Hinter der DEA mit dem geringeren Förderstrom ist die Fließgeschwindigkeit im Vergleich zur Pumpensteuerung HEIN+OETI (hyd opt.) geringer. Hinter der DEA mit dem höheren Förderstrom ist die Fließgeschwindigkeit dagegen höher. Der in Formel 2.5 beschriebene exponentielle Charakter der Druckverlusthöhen führt bei ungleicher Förderstromaufteilung theoretisch in Summe zu größeren Druckverlusten als bei gleicher Aufteilung, sodass die Pumpensteuerung HEIN+OETI (hyd opt.) als hydraulisch optimiert bezeichnet wird. Die gleiche Aufteilung der Förderströme führt bei den Lastfällen $Q = 75 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q = 275 \text{ m}^3/\text{h}$ sowie $Q = 475 \text{ m}^3/\text{h}$ allerdings zu einer Verschlechterung der Wirkungsgrade.

4.5.1. Vergleich der DEAs HEIN und OETI

Es erfolgt ein Vergleich zwischen den DEAs HEIN und OETI, um eventuelle Vorteile bei der Versorgung der MZ_{SOLL} einer DEA gegenüber der anderen festzustellen. Dazu wird angenommen, dass die Versorgung jeweils zu 100 % über die jeweilige DEA erfolgt. Zwischen den beiden Pumpensteuerungen ist innerhalb des Vertrauensbereichs kein Unterschied festzustellen. Der Jahresenergiebedarf bei einer alleinigen Versorgung über die DEA OETI liegt zwischen 248.000 und 273.500 kWh. Der Jahresenergiebedarf der DEA HEIN liegt zwischen 246.500 und 272.000 kWh.

Im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels wird zum Vergleich der Pumpensteuerung „alleinige Versorgung durch eine einzelne DEA“ mit den anderen Pumpensteuerungen der Energiebedarf der DEA HEIN herangezogen.

4.5.2. Vergleich des Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen

Es folgt die Darstellung der Ergebnisse zum Jahresenergiebedarf der nach Tabelle 10 unterschiedenen Pumpensteuerungen. Der Jahresenergiebedarf jeder Pumpensteuerung wird über die fünf im Lastprofil klassifizierten Förderströme ermittelt. Für jeden Förderstrom wird der Jahresenergiebedarf der Pumpensteuerungen in einer eigenen Abbildung dargestellt.

In Abbildung 16 ist der Jahresenergiebedarf der fünf Pumpensteuerungen für den Förderstrom $Q = 75 \text{ m}^3/\text{h}$ dargestellt. Die Pumpensteuerung HEIN+OETI ($\eta \text{ opt.}$) entspricht in diesem Fall der Pumpensteuerung HEIN, da der bestmögliche Pumpenwirkungsgrad einer DEA bei $Q = 90 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht wird. Zur Bereitstellung des Förderstroms $Q = 75 \text{ m}^3/\text{h}$ reicht bei der Simulation der wirkungsgradoptimierten Pumpensteuerung HEIN+OETI ($\eta \text{ opt.}$) der alleinige Betrieb der DEA HEIN aus. Die Pumpensteuerungen HEIN+OETI+MATH 90 ($\eta \text{ opt.}$) und HEIN+OETI+MATH 180 ($\eta \text{ opt.}$) entsprechen ebenfalls der Pumpensteuerung HEIN, da die grundlastfähige DEA MATH beim vorliegenden Förderstrom ebenfalls nicht zugeschaltet wird. Der Jahresenergiebedarf der Pumpensteuerung HEIN liegt für diesen Förderstrom zwischen 13.500 und 15.000 kWh. Im Vergleich dazu befindet sich der Jahresenergiebedarf der Pumpensteuerung HEIN+OETI (hyd opt.) zwischen 17.000 und 18.500 kWh und wird damit als wesentlich höher angesehen.

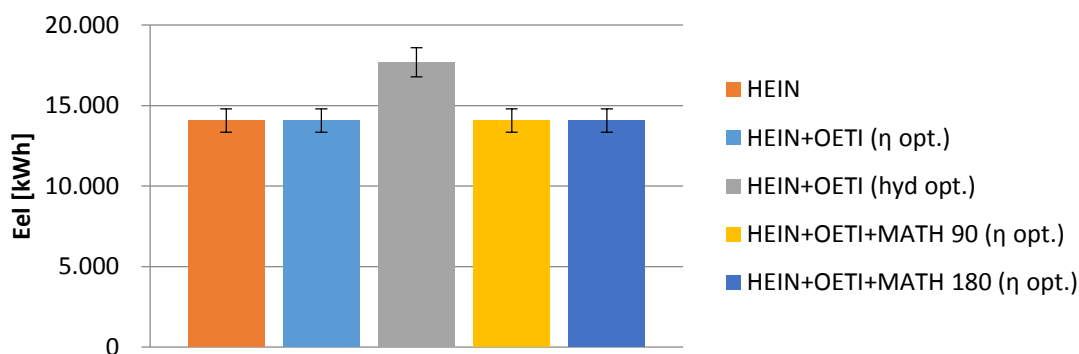


Abbildung 16: Gegenüberstellung des Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen bei einem Förderstrom von $Q = 75 \text{ m}^3/\text{h}$

In Abbildung 17 ist der Jahresenergiebedarf der fünf Pumpensteuerungen für den Förderstrom $Q = 175 \text{ m}^3/\text{h}$ dargestellt. Die Pumpensteuerung HEIN+OETI+MATH 180 ($\eta \text{ opt.}$) entspricht der Pumpensteuerung HEIN+OETI+MATH 90 ($\eta \text{ opt.}$), da die zweite Pumpe der grundlastfähigen DEA MATH beim vorliegenden Förderstrom noch nicht zugeschaltet werden kann. Der Jahresenergiebedarf der Pumpensteuerungen liegt für diesen Förderstrom im Bereich von 54.000 bis 62.500 kWh und unterscheidet sich zwischen den Pumpensteuerungen nicht wesentlich.

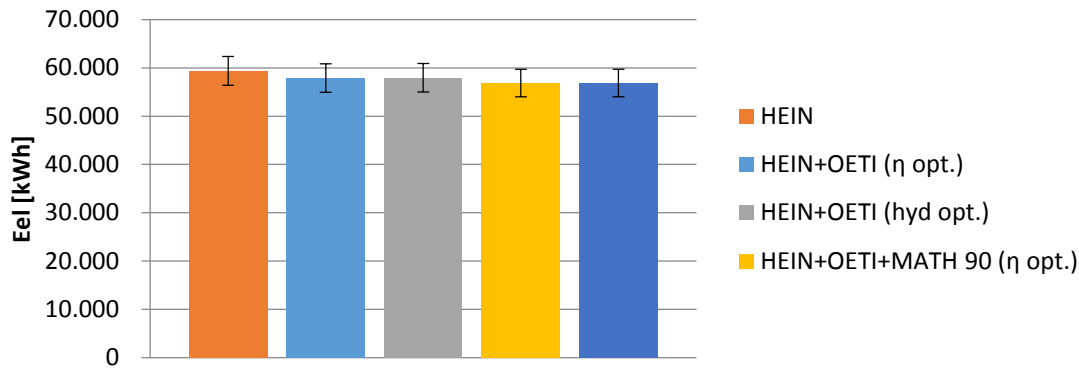


Abbildung 17: Gegenüberstellung des Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen bei einem Förderstrom von $Q = 175 \text{ m}^3/\text{h}$

In Abbildung 18 ist der Jahresenergiebedarf der fünf Pumpensteuerungen für den Förderstrom $Q = 275 \text{ m}^3/\text{h}$ dargestellt. Der Jahresenergiebedarf der Pumpensteuerungen liegt für diesen Förderstrom im Bereich von 113.000 bis 137.000 kWh und unterscheidet sich zwischen den Pumpensteuerungen nur unwesentlich.

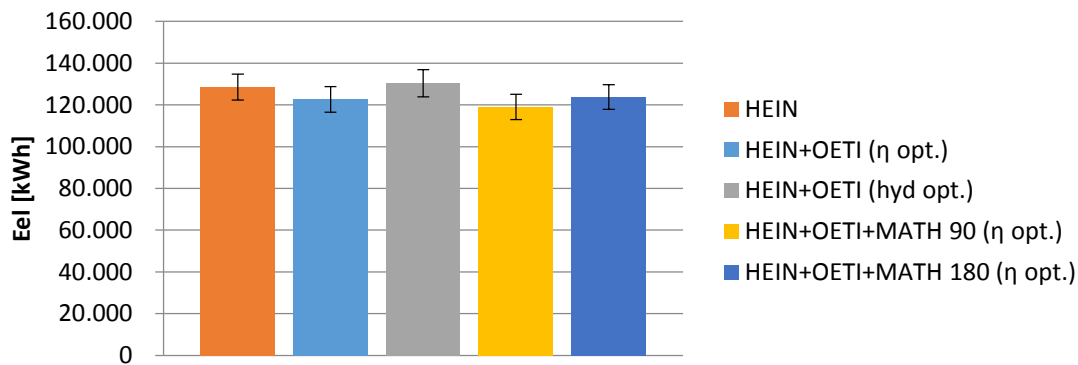


Abbildung 18: Gegenüberstellung des Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen bei einem Förderstrom von $Q = 275 \text{ m}^3/\text{h}$

In Abbildung 19 ist der Jahresenergiebedarf der fünf Pumpensteuerungen für den Förderstrom $Q = 375 \text{ m}^3/\text{h}$ dargestellt. Der Jahresenergiebedarf der Pumpensteuerung HEIN liegt für diesen Förderstrom zwischen 51.500 und 56.500 kWh. Der Jahresenergiebedarf der Pumpensteuerungen HEIN+OETI+MATH 90 (η opt.) sowie HEIN+OETI+MATH 180 (η opt.) liegt zwischen 46.000 und 51.000 kWh und somit wesentlich unterhalb des Jahresenergiebedarfs der Pumpensteuerung HEIN. Der Jahresenergiebedarf der Pumpensteuerungen HEIN+OETI (η opt.) und HEIN+OETI (hyd opt.) liegt zwischen den oben genannten Pumpensteuerungen und unterscheidet sich für diesen Förderstrom von keiner anderen Pumpensteuerung wesentlich.

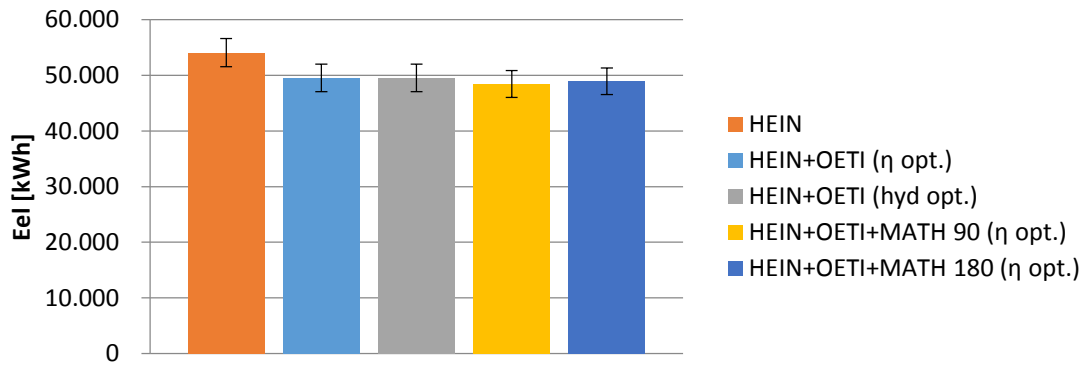


Abbildung 19: Gegenüberstellung des Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen bei einem Förderstrom von $Q = 375 \text{ m}^3/\text{h}$

In Abbildung 20 ist der Jahresenergiebedarf der fünf Pumpensteuerungen für den Förderstrom $Q = 475 \text{ m}^3/\text{h}$ dargestellt. Der Jahresenergiebedarf der Pumpensteuerung HEIN liegt für diesen Förderstrom zwischen 3.000 und 3.500 kWh. Der Jahresenergiebedarf der restlichen vier Pumpensteuerungen liegt dabei zwischen 2.500 und 3.000 kWh und unterscheidet sich damit wesentlich vom Jahresenergiebedarf der Pumpensteuerung HEIN.

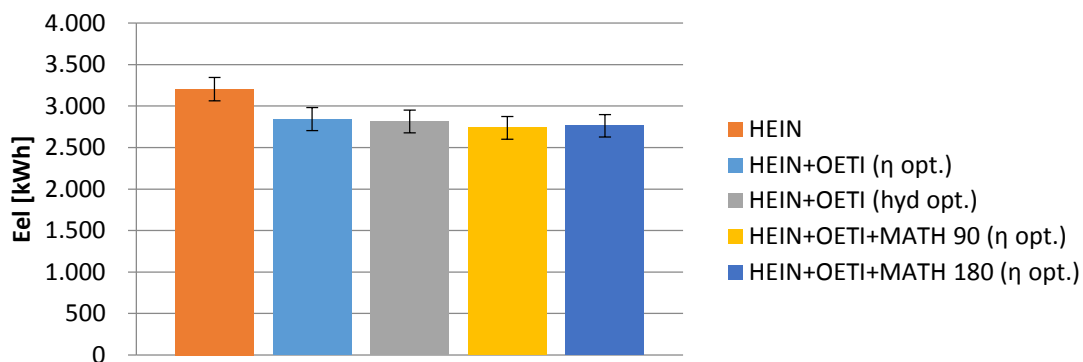


Abbildung 20: Gegenüberstellung des Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen bei einem Förderstrom von $Q = 475 \text{ m}^3/\text{h}$

In Abbildung 21 wird der Jahresenergiebedarf der Förderströme jeder Pumpensteuerung aufsummiert und als Gesamtbedarf dem Gesamtbedarf der anderen Pumpensteuerungen gegenübergestellt. In der Gesamtbetrachtung, in der sowohl der Jahresenergiebedarf als auch der Vertrauensbereich aller fünf oben aufgeführten Förderstromklassen für jede Pumpensteuerung aufsummiert wird, sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Pumpensteuerungen festzustellen.

Die Grenzen, in denen sich der zu erwartende Jahresenergiebedarf bewegt, werden durch die Pumpensteuerungen HEIN+OETI+MATH 90 (η opt.) und HEIN vorgegeben. Der zu erwartende Jahresenergiebedarf nach Pumpensteuerung HEIN+OETI+MATH 90 (η opt.) liegt zwischen 229.000 und 253.500 kWh. Der nach Pumpensteuerung HEIN liegt zwischen 246.500 und 272.000 kWh.

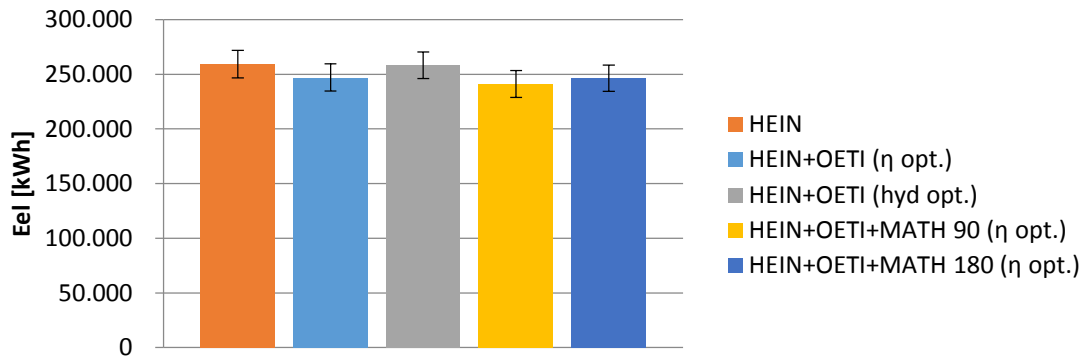


Abbildung 21: Gegenüberstellung des gesamten Jahresenergiebedarfs unterschiedlicher Pumpensteuerungen

4.5.3. Pumpensteuerung

Der oben in verschiedenen Abbildungen dargestellte Energiebedarf unterschiedlicher Pumpensteuerungen wird als Ergebnis für Empfehlungen hinsichtlich der Pumpensteuerung zur Versorgung der MZ_{SOLL} zusammengefasst wiedergegeben. Zur Versorgung der MZ_{SOLL} beim Lastfall $Q = 75 \text{ m}^3/\text{h}$ sollte nur eine Pumpe einer DEA betrieben werden. Eine Aufteilung des Förderstroms auf zwei DEAs führt zu einem wesentlich höheren Energiebedarf. Für die Lastfälle $Q = 175 \text{ m}^3/\text{h}$ und $Q = 275 \text{ m}^3/\text{h}$ können keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Pumpensteuerungen in Bezug auf den Energiebedarf festgestellt werden, sodass auch für die Pumpensteuerung keine belastbare Empfehlung gegeben werden kann. Für die Lastfälle $Q = 375 \text{ m}^3/\text{h}$ und $Q = 475 \text{ m}^3/\text{h}$ ist der Energiebedarf bei einer alleinigen Versorgung über eine DEA (HEIN oder OETI) wesentlich höher als bei einer nach den vier anderen Pumpensteuerungen auf die DEAs aufgeteilten Versorgung. Zwischen diesen vier Pumpensteuerungen können keine wesentlichen Unterschiede festgestellt werden, sodass lediglich empfohlen werden kann, den Förderstrom für diese Lastfälle auf mehrere DEAs aufzuteilen und nicht über eine einzelne DEA in die MZ_{SOLL} einzuspeisen. Ergänzend wird an dieser Stelle festgehalten, dass die Integration der DEA MATH zu keiner wesentlichen Senkung des Energiebedarfs beitragen kann.

4.5.4. Sensitivitätsanalyse: Pumpenwirkungsgrad

Zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse wird der im späteren Betrieb ungünstigste, denkbare Pumpenwirkungsgrad benötigt. Nach Abbildung 31 (Anhang S. XXIV) wird der Pumpenwirkungsgrad geringer, je weiter sich der Förderstrom beim Betrieb einer Pumpe von $90 \text{ m}^3/\text{h}$ in Richtung $0 \text{ m}^3/\text{h}$ bewegt. Der ungünstigste Pumpenwirkungsgrad läge demnach bei $Q = 0 \text{ m}^3/\text{h}$. Das Wesen des Wirkungsgrades als Verhältnis zweier von Q abhängiger Leistungen lässt für $Q = 0 \text{ m}^3/\text{h}$ keinen Pumpenwirkungsgrad zu. Um einen Pumpwirkungsgrad für den Bereich zwischen 0 und $90 \text{ m}^3/\text{h}$ als ungünstigsten, denkbaren Pumpenwirkungsgrad festzulegen, fehlt eine solide Entscheidungsgrundlage. Jedwede Festlegung wäre rein willkürlich. Des Weiteren liegen in diesem Bereich nur 25 % der prognostizierten Lastfälle.

Durch die Auswahl des ungünstigsten, denkbaren Pumpenwirkungsgrades aus diesem Bereich würde ein geringer Teil der Lastfälle durch die Wahl eines sehr schlechten Pumpenwirkungsgrades überrepräsentiert. Aus diesen Gründen erscheint die Auswahl aus diesem Bereich nicht praktikabel.

Der weitere Verlauf des Pumpenwirkungsgrades in Abbildung 31 für den Bereich $Q > 90 \text{ m}^3/\text{h}$ wird durch das Zuschalten weiterer Pumpen bei höheren Förderströmen bestimmt. Der Pumpenwirkungsgrad nimmt ab dem Optimum bei $Q = 90 \text{ m}^3/\text{h}$ mit steigendem Förderstrom ab, bis er durch das Zuschalten einer weiteren Pumpe bis zum gemeinsamen Optimum der am Betrieb beteiligten Pumpen ansteigt. Dieser Ablauf wiederholt sich bis zum Zuschalten der letzten Pumpe. Im Bereich ab $90 \text{ m}^3/\text{h}$ werden die restlichen 75 % der Lastfälle eines Jahres erwartet. Es erscheint sinnvoll, den ungünstigsten Pumpenwirkungsgrad zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse aus diesem Bereich zu wählen. Dieser befindet sich zwischen dem ersten und zweiten Optimum bei $Q = 115 \text{ m}^3/\text{h}$ und beträgt $\eta_{Pu} = 70 \%$.

Der Jahresenergiebedarf der Pumpensteuerung DEA HEIN wird mit dem ungünstigen Pumpenwirkungsgrad von 70% berechnet und mit dem Jahresenergiebedarf der Pumpensteuerung DEA HEIN verglichen, für den zur Berechnung die zu den Förderströmen zugehörigen Pumpenwirkungsgrade herangezogen wurden. In Abbildung 22 wird der Jahresenergiebedarf beider Pumpensteuerungen gegenübergestellt. Durch die Absenkung des Pumpenwirkungsgrades auf $\eta_{Pu} = 70 \%$ steigt der Jahresenergiebedarf um ca. 9 % an.

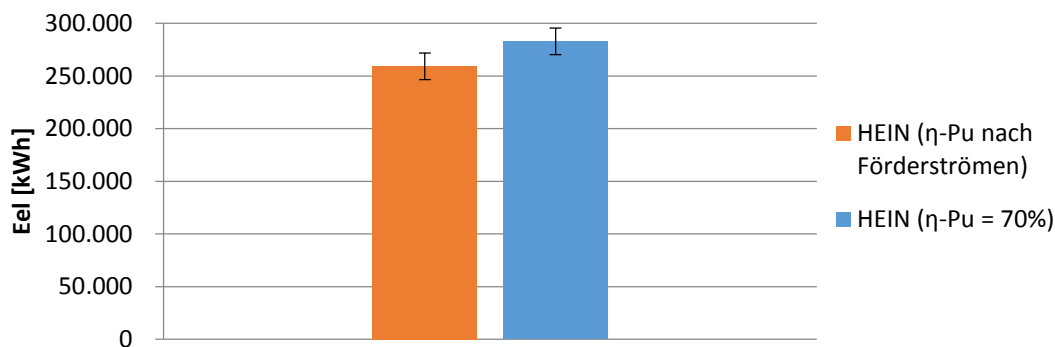


Abbildung 22: Gegenüberstellung des Jahresenergiebedarfs bei alleiniger Versorgung durch die DEA HEIN bei unterschiedlichen Pumpenwirkungsgraden

4.6. Ergebnisse der Investitionsrechnung zur möglichen Integration der DEA MATH

Im folgenden Unterkapitel werden die Ergebnisse der Investitionsrechnung zur möglichen Integration der DEA MATH aufgeführt. Dazu werden zuerst die zur Durchführung der Annuitätenmethode nötigen Rahmenbedingungen dargestellt. Im Anschluss folgen die Ergebnisse der Annuitätenmethode und der Sensitivitätsanalysen als jährliche Vermögensänderung, die das WVU durch die Investition in die Sanierung und Integration der DEA MATH in das Versorgungskonzept der MZ_{SOLL} erfahren würde.

4.6.1. Rahmenbedingungen

Zur Sanierung der DEA MATH müssen Investitionen in Objekte mit unterschiedlichen Nutzungsdauern getätigt werden. Es wird in die Sanierung des Gebäudes, in Rohrleitungen, in Pumpen sowie in Mess- und Fernwirktechnik investiert. In Tabelle 11 werden die Investitionen, der Liquidationserlös der Pumpen sowie die Nutzungsdauer der Investitionen aufgeführt. Für die Investitionen in das Gebäude, die Rohrleitungen sowie die Mess- und Fernwirktechnik wird eine Nutzungsdauer von 40 Jahren angenommen. Auch wenn die reale Nutzungsdauer des Gebäudes und der Rohrleitungen die angenommene in diesem Fall übersteigt, wird die Nutzungsdauer solcher langfristiger Investitionen im betroffenen WVU betriebswirtschaftlich nicht höher angesetzt. Durch den hohen Abzinsungseffekt würde eine höhere Nutzungsdauer das Ergebnis nicht entscheidend beeinflussen (ENTEKA 2015). Die angenommene Nutzungsdauer der Pumpen beträgt 20 Jahre. Zur Durchführung der Annuitätenmethode wird eine Gesamtnutzungsdauer der Investition von 40 Jahren angenommen. Dazu wird nach 20 Jahren in neue Pumpen investiert. Der angenommene Liquidationserlös von 146 € der zwei Pumpen der DEA MATH nach jeweils 20 Jahren ergibt sich aus dem aktuellen Schrottwert für Elektromotoren (Dabkowski 2015).

Tabelle 11: Zu tätige Investitionen in die DEA MATH

Investition	Kosten [€]	Liquidations- erlös [€]	Nutzungs- dauer [a]
Gebäude	17.500	-	40
Pumpen	15.000	146	20
Rohrleitungen	12.500	-	40
Mess-/Fernwirktechnik	8.000	-	40

In Tabelle 12 werden die jährlichen Kosten der Investition dargestellt. Unter Wartung und Instandhaltung fallen die wöchentliche Anlagenbegehung durch Betriebspersonal sowie die Wartung der Pumpen durch den Hersteller alle 2 Jahre. Insgesamt werden dafür jährlich 2.800 € veranschlagt (ENTEKA 2015).

Die negativ einfließenden Kosten unter dem Punkt „Energie“ ergeben sich aus dem potenziellen monetären Nutzen der Investition, der durch die Umstellung des Netzbetriebes von Pumpensteuerung HEIN+OETI (η opt) auf HEIN+OETI+MATH 90 (η opt.) erzielt werden kann.

Dazu werden der für das Jahr 2015 abgerechnete Nettoarbeitspreis von 0,234 €/kWh und ein Grundpreis von 80 €/a zugrunde gelegt (ENTEGA 2015). Durch den energieeffizienteren Netzbetrieb der Pumpensteuerung HEIN+OETI+MATH 90 (η opt.) im Vergleich zur Pumpensteuerung HEIN+OETI (η opt.) sinken die jährlichen Energiekosten um 1.382 €/a (vgl. Unterkapitel 4.5). Als negative Kosten deklariert, fließt dieser Nutzen als jährlicher Erlös in die Annuitätenmethode mit ein.

Tabelle 12: Jährliche Kosten der DEA MATH

Kostenart	Kosten [€/a]
Wartung/Instandhaltung	2.800
Energieeinsparung	- 1.382

In Tabelle 13 werden alle weiteren Annahmen zur Durchführung der Annuitätenmethode angeführt. Der für interne Rechnungen des WVUs angenommene, langfristige Zinssatz beträgt 6 % (ENTEGA 2015). Der Annuitätenfaktor ergibt sich aus Formel 3.16 (vgl. Unterkapitel 3.8.1).

Tabelle 13: Annahmen zur Durchführung der Annuitätenmethode zur wirtschaftlichen Bewertung der Integration der DEA MATH

Annahmen	Einheit	Wert
Investitionszeitraum	[a]	40
Zinssatz	[%]	6
Annuitätenfaktor	[%]	6,65
Arbeitspreis	[€/kWh]	0,234
Grundpreis	[€/a]	80,00

4.6.2. Ergebnisse der Annuitätenmethode und Sensitivitätsanalysen

In Tabelle 14 werden die Ergebnisse der Annuitätenmethode dargestellt. Der ermittelte Kapitalwert der Investition beträgt - 86.913 €. Die jährliche Überschuss-Annuität beträgt - 5.427 €. Dies bedeutet, dass das WVU bei einer Realisierung des Projekts eine jährliche Vermögensänderung von - 5.427 € erfährt, wenn der Strompreis über 40 Jahre konstant bleibt und der in Unterkapitel 4.5 ermittelte energetische Vorteil der Pumpensteuerung HEIN+OETI+MATH 90 (η opt.) gegenüber der Pumpensteuerung HEIN+OETI (η opt) ohne Berücksichtigung der Vertrauensbereiche besteht.

Tabelle 14: Kapitalwert und Überschuss-Annuität der Investition in die Integration der DEA MATH

Kennziffer	Einheit	Wert
Kapitalwert	[€]	- 86.913
Überschuss-Annuität	[€/a]	- 5.427

Ergebnis der Sensitivitätsanalyse: Variation des Strompreises

Bei einem angenommenem Strompreis von 0,5 €/kWh, beträgt die jährliche Vermögensänderung ohne Berücksichtigung der Vertrauensbereiche - 3.751 €/a.

Ergebnis der Sensitivitätsanalyse: Variation der von den DEAs aufzubringenden Förderhöhe

Der in Unterkapitel 4.5 ermittelte energetische Vorteil der Pumpensteuerung HEIN+OETI+MATH 90 (η opt.) gegenüber der Pumpensteuerung HEIN+OETI (η opt) wird dort als unwesentlich eingestuft, da sich die aus der Genauigkeit der Methode ergebenden Vertrauensbereiche überschneiden. Deshalb wird die von den DEAs jeweils aufzubringende Förderhöhe zur Versorgung der MZ_{SOLL} im Rahmen der Vertrauensbereiche variiert. Für die Variante „Pro DEA MATH“ beträgt die jährliche Vermögensänderung bei einem Strompreis von 0,234 €/kWh - 3.401 €/a. Für die Variante „Contra DEA MATH“ beträgt die jährliche Vermögensänderung - 7.452 €/a.

4.7. Suche nach weiterem Optimierungspotenzial

Im folgenden Unterkapitel werden die Ergebnisse vorgestellt, die sich bei der Suche nach weiterem Optimierungspotenzial durch die Untersuchung des Netzes hinsichtlich hoher Druckverluste ergeben. Ziel ist es, Rohrleitungen zu identifizieren, deren Sanierung die dort auftretenden Druckverluste soweit verringern würde, dass sich die vorgezogene Investition in die Sanierung durch die Einsparung von Pumpenenergie amortisierte. Dazu wird zuerst der Zusammenhang zwischen Förderhöhenabsenkung, die dadurch sinkenden jährlichen Energiekosten und die Rohrleitungslänge, in die deshalb vorzeitig reinvestiert werden kann, vorgestellt. Darauf folgt die Darstellung der Ergebnisse, aus denen hervorgeht, dass keine passenden Rohrleitungen zur vorzeitigen Sanierung vorhanden sind.

4.7.1. Förderhöhenabsenkung und vorzeitige Investitionen in Rohrsanierung

Abbildung 23 stellt den Zusammenhang zwischen Förderhöhenabsenkung, dadurch sinkenden jährlichen Energiekosten und Rohrleitungslänge, in die deshalb vorzeitig reinvestiert werden kann, dar. Die von der Förderhöhenabsenkung abhängige Energiekostensenkung wird auf der linken Hochachse aufgetragen. Auf der rechten Hochachse wird die Rohrleitungslänge aufgetragen, deren Investitionskosten durch die sinkenden Energiekosten gedeckt werden. Bei der Investitionsrechnung wird ein Strompreis von 0,234 €/kWh angesetzt. Die betriebspezifischen Rohrsanierungskosten betragen 300 €/m (ENTEKA 2015). Die Investitionsrechnung bezieht sich auf eine Nutzungsdauer der Rohrleitungen von 40 Jahren.

Im Folgenden wird ein Beispiel zu der Art und Weise gegeben, wie Abbildung 23 zu verstehen ist. Eine Absenkung der von den Pumpen aufzubringenden Förderhöhe um 1,6 m senkt die Energiekosten um 3.050 €/a. Die dadurch über 40 Jahre jährlich frei werdenden Mittel können zum jetzigen Zeitpunkt in die Sanierung von 153 m Rohrleitung investiert werden, ohne eine Vermögensänderung des WVU über 40 Jahre zu bewirken. Im Umkehrschluss bedeutet dieser Zusammenhang für die Suche nach weiterem Optimierungspotenzial in Bezug auf hohe Druckverluste, dass eine vorzeitige Reinvestition in Rohrleitungssanierung nur dann Sinn macht, wenn durch die Sanierung von 153 m Rohrleitung eine Förderhöhenabsenkung von mindesten 1,6 m erzielt wird.

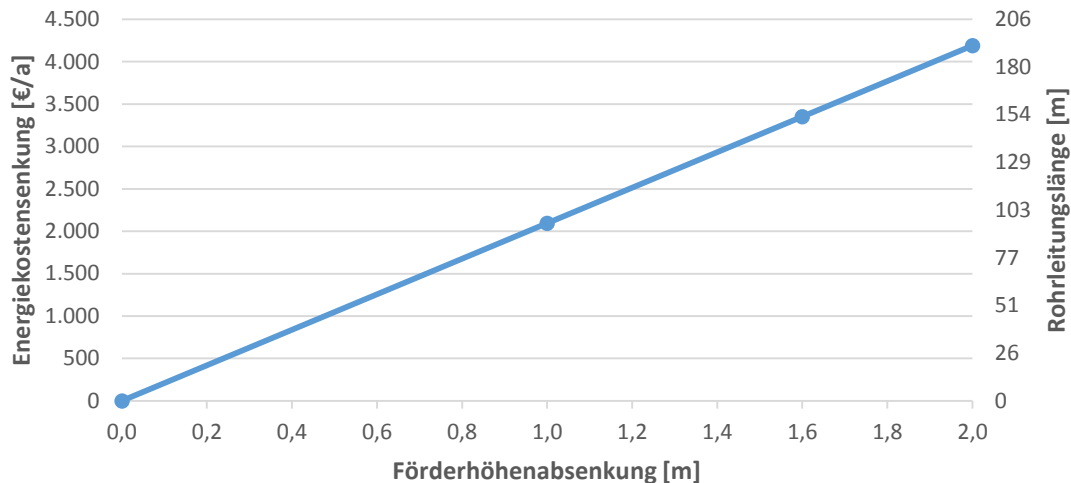


Abbildung 23: Zusammenhang zwischen Förderhöhenabsenkung, sinkende Energiekosten und Rohrleitungslänge

4.7.2. Ergebnisse der Untersuchung des Rohrnetzes hinsichtlich des druckverlustbedingtem Optimierungspotenzials

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Suche nach passenden Rohrleitungen für die nötige Förderhöhenabsenkung vorgestellt. Zuerst wird der für die Simulationen zu Grunde gelegte Lastfall genannt und erläutert, weshalb dieser ausgewählt wird. Danach wird dargelegt, warum keine passenden Rohrleitungen für die nötige Förderhöhenabsenkung ermittelt werden können.

Auswahl des für die Simulationen verwendeten Lastfalls

Um die auftretenden Druckverluste nicht zu über- oder unterbewerten, wird mit $Q = 275 \text{ m}^3/\text{h}$ der mittlere der fünf für die MZ_{SOLL} ermittelten Lastfälle des Lastprofils gewählt. Mit 3500 h/a tritt dieser Lastfall im Vergleich zu den vier anderen am häufigsten ein (siehe Abbildung 14). Des Weiteren fallen bei allen simulierten Pumpensteuerungen ca. 50 % des anfallenden Jahresenergiebedarfs auf diesen Lastfall. Dies unterstreicht die herausragende Bedeutung dieses Lastfalls bei der Versorgung der MZ_{SOLL} . Damit gibt der Lastfall $Q = 275 \text{ m}^3/\text{h}$ die durchschnittlichen Netzbedingungen wieder und wird für die Ermittlung der Druckverluste verwendet.

Ergebnisse

Zusammengefasst sieht die Vorgehensweise vor, Rohrleitungen mit hohen Druckverlusten im Netzmodell auszutauschen, die Strömungsverhältnisse mit dem oben ausgewählten Lastfall zu simulieren und die Druckhöhe am kritischen Knotenpunkt mit der aus der Simulation des unveränderten Netzmodells zu vergleichen. Dabei werden auf Basis der durch die Kalibrierung des Rechnetzmodells vorgegebenen Genauigkeit der Simulationen Druckhöhenunterschiede ab 1,6 m als wesentlich angesehen (vgl. Unterkapitel 4.4.1).

Unter diesen Bedingungen können keine Rohrleitungen identifiziert werden, deren Austausch eine ausreichende Erhöhung des Drucks am kritischen Knotenpunkt zur Folge hat. Beispielhaft wird in Tabelle 15 aufgezeigt, wie sich der Austausch der 2350 m Rohrleitung mit den höchsten Druckverlusten auf die Druckhöhenentwicklung an bestimmten Punkten im Netz und damit die potenzielle Förderhöhenabsenkung der Pumpen auswirkt. Am kritischen Knotenpunkt im Zeyerweg steigt die Druckhöhe nicht, am Breslauer Platz um 1,6 m sowie im Martinspfad um 0,3 m. Im Anhang ab S. L befinden sich Abbildung 43 und Abbildung 44. Diese zeigen das Simulationsergebnis im unveränderten sowie im optimierten Zustand an. Die gelb und rot eingezeichneten Rohrleitungen wurden im optimierten Zustand ausgetauscht.

Tabelle 15: Druckhöhenentwicklung an unterschiedlichen Punkten im Netzmodell durch die Sanierung von 2350 m Rohrleitung

Punkt im Netz	Druckhöhe unverändert [m]	Druckhöhe optimiert [m]
DEA OETI	216,3	216,3
DEA HEIN	216,4	216,4
Zeyerweg ⁽¹⁾	216,2	216,2
Breslauer Platz	214,5	216,1
Martinspfad	215,3	215,8
Bemerkung: ⁽¹⁾ kritischer Knotenpunkt		

Um die Förderhöhe der DEAs aus energetischen Gründen abzusenken, müsste die Druckhöhe im kritischen Knotenpunkt im Zeyerweg wesentlich steigen. Diese verbleibt allerdings bei 216,2 m. Es wird vermutet, dass keine Erhöhung des Drucks stattfindet, da sich entlang der Hauptströmungswege zwischen den DEAs und dem kritischen Knotenpunkt nur wenige Leitungen mit hohen Druckverlusten befinden (vgl. Abbildung 43 und Abbildung 44). Ein einzelner Austausch von Leitungen zwischen den DEAs und dem Zeyerweg bringt ebenfalls nicht die gewünschte Erhöhung des Drucks, sodass kein Vorschlag zur vorzeitigen Sanierung von Rohrleitungen zur Reduzierung strömungsbedingter Druckverluste unterbreitet werden kann.

5. Diskussion und Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit diskutiert und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen vorgestellt.

In Unterkapitel 5.1 wird die Plausibilität des für die HZs ermittelten elektrischen Energiebedarfs des ALT-Zustandes diskutiert. Dort wird erläutert, warum der ermittelte Wert von 480.000 kWh für den Energiebedarf des ALT-Zustandes im Jahr 2013 bis auf eine mögliche Abweichung von 3,2 % als plausibel angesehen wird.

In Unterkapitel 5.2 werden die Ergebnisse des für die MZ_{SOLL} ermittelten elektrischen Energiebedarfs diskutiert. Dabei wird erläutert, warum die hier ermittelten Werte für den Energiebedarf mit dem jetzigen Mess- und Regelsystem wahrscheinlich nicht erreicht werden können. Es wird dargelegt, wie das Mess- und Regelsystem erweitert werden muss, um den Energiebedarf auf die hier ermittelten Werte abzusenken. Danach werden die Aussagekraft des Lastprofils und die Abbildung der Vordrucksituation im Rechnernetzmodell diskutiert und bewertet. Weiterhin wird die von Hähnlein (2008) verwendete Methodik zur Betriebsoptimierung beschrieben, mit der in dieser Arbeit verwendeten Methodik verglichen und ein Ansatz zur Anwendung des von Hähnlein entwickelten Optimierungsmodells für die in dieser Arbeit betrachtete MZ_{SOLL} entwickelt.

In Unterkapitel 5.3 wird das Ergebnis der Investitionsrechnung zur möglichen Integration der DEA MATH diskutiert. Es wird diskutiert, ob das Ergebnis der Investitionsrechnung zur Integration der DEA MATH als solide zu betrachten ist und die Durchführung der Maßnahme damit aus wirtschaftlicher Sicht als nicht vorteilhaft angesehen werden kann.

5.1. Diskussion der Ergebnisse zum elektrischen Energiebedarf des ALT-Zustandes

Im folgenden Unterkapitel wird die Plausibilität des für die HZs ermittelten elektrischen Energiebedarfs des ALT-Zustands diskutiert und die daraus gezogenen Schlussfolgerungen erläutert. Das Unterkapitel wird dazu nach den HZs gegliedert. Zuerst werden die Schlussfolgerungen vorgestellt, die sich aus der gegebenen Plausibilität der Förder- und Energiemengen der HZ2a und MZ_{ALT} schließen lassen. Danach wird darauf eingegangen, warum die fehlende Plausibilitätsprüfung der HZ3b als nicht problematisch angesehen wird. Weiterhin werden die möglichen Gründe dafür diskutiert, dass die Plausibilität der für die HZ3a ermittelten Förder- und damit auch Energiemengen nicht gegeben ist. Durch die dort entstehende Unsicherheit, kann der Energiebedarf des ALT-Zustandes im Vergleich zum ermittelten Wert um bis zu 3,2 % sinken.

5.1.1. HZ2a und MZ_{ALT}

Die Plausibilitätsprüfung der 2013 in die HZs geförderten Mengen ergibt, dass die für die HZ2a und MZ_{ALT} ermittelten Fördermengen plausibel sind. Zwischen den um die Wasserverluste korrigierten Mengen der Kundenabrechnungen 2012 und den Fördermengen 2013 liegen Schwankungen zwischen 2 und 3 %, die sich mit den Verbrauchsschwankungen der umliegenden Gemeinden decken. Im Umkehrschluss kann deshalb darauf geschlossen werden, dass die Wasserzähleinrichtungen der die HZ2a und MZ_{ALT} versorgenden DMAs sowie der DEAs HEIN HZ1, HEIN MZ und MARI trotz unbekanntem Eichzustands eine für die Zwecke dieser Arbeit ausreichende Genauigkeit besitzen. Der ermittelte Energiebedarf der drei DEAs wird durch die Verbrauchsabrechnung des Energieversorgers ebenfalls bestätigt. Die für die HZ2a und MZ_{ALT} festgestellte Plausibilität der Fördermengen weist außerdem darauf hin, dass die vom WVU angesetzten Wasserverluste von 3 % für dieses Gebiet zutreffen.

5.1.2. HZ3b

Die fehlende Plausibilitätsprüfung der 2013 in die HZ3b geförderten Mengen wird nicht als problematisch angesehen, da der Anteil der HZ3b am Wasserverbrauch der die MZ_{SOLL} bildenden HZs mit 2 % als unwesentlich für das Gesamtergebnis betrachtet wird.

5.1.3. HZ3a

Die Differenz zwischen den 2013 in die HZ3a geförderten Mengen und den um die Wasserverluste korrigierten abgerechneten Mengen aus dem Jahr 2012 ist nicht plausibel. 2013 wurden 10 % mehr Wasser in die HZ3a gefördert, als 2012 abgerechnet wurde. Diese Schwankung kann durch die jahresbedingten Unterschiede allein nicht begründet werden. Bei der Ergründung der Ursachen können lediglich Vermutungen angestellt werden.

Diese werden im folgenden Abschnitt anhand der die HZ3a versorgenden DEAs und DMAs diskutiert. Die HZ3a wird direkt durch die DEAs OBER und MATH sowie indirekt durch die DEAs HEIN HZ1 und MARI über die DMA HEIN HZ3a versorgt. Über das ÜSV HEIH wird Wasser bei Drucküberschreitungen in die NZ ausgespeist.

ÜSV HEIH

Laut des vor dem ÜSV HEIH 2013 angebrachten Wasserzählers speiste das ÜSV 4 % des in die HZ3a geförderten Wassers zur Druckregulierung in die NZ aus. Da nicht bekannt ist, wann und ob der Zähler geeicht wurde, besteht die Möglichkeit, dass durch Schleichverluste mehr Wasser in die NZ ausgespeist, als vom Zähler gemessen wird.

DMA HEIN HZ3a

Ein weiterer Grund für die Unstimmigkeiten könnte das zur Messung der durch die DMA HEIN HZ3a in die HZ3a eingespeisten Mengen verwendete Zählerarrangement sein. Die durch die DMA HEIN HZ3a eingespeisten Mengen werden nicht direkt gemessen, sondern aus der Differenz eines IDM-Zählers, der den DMAs HEIN HZ2a und HEIN HZ3a vorgeschaltet ist, und eines Mono-Zählers, der lediglich der DMA HEIN HZ2a vorgeschaltet ist, berechnet. Da die Plausibilität der in die HZ2a geförderten Mengen gegeben ist, wird der Mono-Zähler der DMA HEIN HZ2a trotz der zu kurzen Einlaufstrecke als ausreichend genau eingestuft. Der den DMAs HEIN HZ2a und HEIN HZ3a vorgeschaltete IDM-Zähler weist sowohl in Einlauf- als auch Auslaufstrecke mangelhafte Einbaubedingungen auf. Dadurch wird das Strömungsprofil möglicherweise soweit beeinflusst, dass daraus falsche Messergebnisse resultieren. Die Einbaubedingungen werden im Anhang auf S. XVIII f in den Abbildungen 25, 26 und 27 dargestellt.

DEA OBER

Die für die DEA OBER ermittelte Fördermenge basiert auf der Multiplikation der Förderleistung von 34,5 m³/h je Pumpe mit der stundenweise aufgezeichneten Betriebsdauer der Pumpen. Die Förderleistung ergibt sich aus der Fördermenge, die in einem Jahr über einen vorgeschalteten Wasserzähler ohne Fernübertragung gezählt wird, dividiert durch die vom Betriebsstundenzähler gezählten Betriebsstunden.

Für den Wasserzähler gelten die gleichen Grundsätze, wie für die in allen anderen DEAs und DMAs eingebauten Zähler. Es ist nicht bekannt, wann und ob der Zähler geeicht wurde. Weiterhin kann nicht garantiert werden, dass die Bauausführung den Empfehlungen zur Vergleichmäßigung des Strömungsprofils entsprechen. Da die Zähler der DEAs HEIN HZ1, HEIN MZ und MARI trotz der gleichen Umstände plausible Ergebnisse liefern, liegt der Schluss nahe, dass auch der Wasserzähler der DEA OBER eine ausreichende Genauigkeit besitzt. Diese These kann im Rahmen dieser Arbeit nicht überprüft werden.

DEA MATH

Die DEA MATH ist im Gegensatz zur DEA OBER mit einem Wasserzähler ausgerüstet, der die Fördermenge stundenweise an die LZH und QVL übermittelt. Für diesen gelten die gleichen Grundsätze in Hinblick auf die Genauigkeit, die auch für den Zähler der DEA OBER gelten und oben geschildert werden.

Reale und scheinbare Wasserverluste

Außer den bis jetzt aufgeführten Gründen müssen auch die bereits in Unterkapitel 3.1.2 aufgeführten scheinbaren und realen Wasserverlusten im Netz an dieser Stelle erwähnt werden. So können z.B. Wasserdiebstal und Abgrenzungsverluste oder vermehrt auftretende Undichtigkeiten und schadhafte Rohrleitungen für die hohe Differenz zwischen geförderter und abgegebener Menge verantwortlich sein (DVGW W 392, S. 16).

Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle die über die Kundenverbrauchsrechnung abgerechnete Wasserabgabe als mögliche Fehlerursache erwähnt. Dass diese durch Schleichverluste der Hauswasserzähler und Abgrenzungsverluste bei der Wasserabrechnung der Grund für die Differenz von 10 % zwischen geförderter und abgerechneter Menge ist, wird allerdings als unwahrscheinlich angesehen. Zum einen werden die Hauswasserzähler nach den Bestimmungen der Mess- und Eichverordnung regelmäßig geeicht. Zum anderen ist es unwahrscheinlich, dass gerade in einer einzelnen HZ eine erhöhte Anzahl an Hauswasserzählern so ungenau messen, dass die Summe der Abweichungen die oben angesprochene Differenz von 10 % bewirkt, während die Hauswasserzähler aller anderen HZs offensichtlich genaue Messwerte liefern.

Kombination aller Faktoren

Letztendlich kann in dieser Arbeit nicht festgestellt werden, was der Grund für die bei der Plausibilitätsprüfung der HZ3a aufgetretenen Unstimmigkeiten ist. Neben den hier aufgeführten möglichen Faktoren kann auch eine Kombination mehrerer Faktoren für die Abweichung zwischen den 2013 in die HZ3a geförderten und den um die Wasserverluste korrigierten im Jahr 2012 abgerechneten Mengen sein.

Auswirkungen auf den elektrischen Energiebedarf des ALT-Zustandes

Abschließend wird darauf hingewiesen, dass mit der nicht gegebenen Plausibilität der in die HZ3a geförderten Mengen auch das Ergebnis der dafür aufgewendeten Energie in Zweifel gezogen werden muss. Dazu muss allerdings eine differenzierte Betrachtung erfolgen. Das Ergebnis der Überprüfung ist, dass 2013 10 % mehr Wasser in die HZ3a gefördert, als 2012 abgerechnet wurde und sich diese Steigerung nicht durch die natürlichen Jahresschwankungen erklären lässt. Kommt die Differenz von 10 % durch Wasserverluste im Netz zustande, trifft der hier für das Jahr 2013 ermittelte Energiebedarf von 480.000 kWh zu, da das im Netz verloren gegangene Wasser auch tatsächlich unter Energieaufwand gefördert wurde.

Wenn dagegen fehlerhaft messende Wasserzähler der DEAs MATH, OBER, der DMA HEIN HZ3a oder des ÜSV HEIH für die Differenz verantwortlich sind, würde in der Realität weniger Wasser in die HZ3a gefördert, als in dieser Arbeit ermittelt wird. Damit wäre auch der reale Energiebedarf niedriger als der ermittelte.

Der Anteil der in die HZ3a geförderten Menge an der Menge, die in alle HZs gefördert wurde, beträgt für das Jahr 2013 32 %. Sind fehlerhaft messende Wasserzähler an den Anlagen der Grund für die Differenz von 10 %, kann der Energiebedarf zur Versorgung aller HZs um bis zu 3,2 % von 480.000 kWh auf bis zu 465.000 kWh sinken.

5.2. Diskussion der Ergebnisse zum elektrischen Energiebedarf des SOLL-Zustandes

Im folgenden Unterkapitel werden die Ergebnisse des für die MZ_{SOLL} ermittelten elektrischen Energiebedarfs diskutiert.

Zuerst wird erläutert, warum nicht erwartet wird, dass sich die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse zum elektrischen Energiebedarf der MZ_{SOLL} sofort nach Umstellung des Betriebs auf den SOLL-Zustand einstellen werden. Aufgrund der hier angewendeten Methodik müssen die Ergebnisse als ein Potenzial begriffen werden, dass durch eine zusätzliche Erweiterung des Mess- und Regelsystems ausgeschöpft werden kann. Weiterhin wird diskutiert, wie ein solches Mess- und Regelsystem grundlegend gestaltet werden muss, um die hier ermittelten Ergebnisse zum elektrischen Energiebedarf der MZ_{SOLL} zu erreichen.

Danach wird die Aussagekraft des in dieser Arbeit verwendeten, extrapolierten Lastprofils diskutiert. Dabei wird auf die Grundlage der Extrapolation, den Einfluss möglicherweise fehlerhafter Fördermengen der HZ3a sowie die zukünftige Entwicklung der Wasserabgabe eingegangen. In einer abschließenden Gesamtbetrachtung wird die Aussagekraft des Lastprofils bewertet.

Anschließend werden die Annahmen diskutiert, die einen Einfluss auf die Vordrücke der DEAs im Rechnetzmodell haben. Dabei wird darauf eingegangen, dass im Rechnetzmodell vor den DEAs Rohrleitungen verlegt werden, um die niederzonenseitig auftretenden Druckverluste in den Simulationen zu berücksichtigen. Weiterhin wird erklärt, warum für jede DEA der gleiche Vordruck im Rechnetzmodell angenommen wird, obwohl Hinweise zu Vordruckunterschieden vorliegen. In einer abschließenden Gesamtbetrachtung wird die Genauigkeit der abgebildeten Vordrucksituation bewertet.

Weiterhin wird festgehalten, dass keine Pumpensteuerung ermittelt werden kann, die gegenüber den anderen Pumpensteuerungen als wesentlich energieeffizienter einzustufen ist. Es werden die möglichen methodischen Ursachen diskutiert und die Arbeit von Hähnlein (2008) vorgestellt, in der ein Optimierungsmodell zur Betriebsoptimierung von Reinwasserpumpen in Verteilnetzen entwickelt wurde. Abschließend wird die Methodik von Hähnlein mit der in dieser Arbeit verwendeten Methodik verglichen und ein Ansatz zur Anwendung dieses Optimierungsmodells auf die in dieser Arbeit betrachteten MZ_{SOLL} entwickelt.

5.2.1. Regelung des Netzdrucks und Begreifen der Ergebnisse als Potenzial

Ein Ziel der Arbeit ist die Ermittlung des Energiebedarfs zur Versorgung der MZ_{SOLL} . Dabei soll eine Pumpensteuerung gefunden werden, die den Energiebedarf minimiert. Um dieses Ziel zu erreichen, wird bei der in Unterkapitel 3.7.1 beschriebenen Methode zur Ermittlung der Förderhöhen so verfahren, dass während jedes Lastfalls im höchsten Punkt des Netzes der Mindestversorgungsdruck von 3,4 bar nicht überschritten wird. Das Mess- und Regelsystem im realen Netzbetrieb ist derzeit nicht in der Lage, diese Vorgaben so einzuhalten. Es müsste erst weiterentwickelt werden, damit die Annahme zutrifft. Deshalb sind die hier erzielten Ergebnisse als ein Potenzial zu verstehen, dass durch die Weiterentwicklung des Mess- und Regelsystems ausgeschöpft werden kann. Dieser Sachverhalt wird in den folgenden Abschnitten näher erläutert. Weiterhin wird ein Vorschlag erarbeitet, wie ein solches Mess- und Regelsystem gestaltet sein muss.

Regelung des Netzdrucks: Methodik vs. realer Netzbetrieb

Das zurzeit in der DEA OETI vorhandene Mess- und Regelsystem basiert auf einer Druckmessung am Ende der DEA und der darauf abgestimmten Anpassung der Förderhöhe der Pumpen mittels FU. Darüber wird sichergestellt, dass am Einspeisepunkt der DEA in das Netz immer der gleiche Druck unabhängig vom Förderstrom ansteht. Der Solldruck am Einspeisepunkt muss so eingestellt sein, dass der Mindestnetzdruck in allen Bereichen des Netzes auch bei maximalem Förderstrom gehalten wird. Im Normalbetrieb wird der maßgebende maximale Förderstrom allerdings nicht erreicht. Das führt dazu, dass bei gleichem Druck am Einspeisepunkt durch einen niedrigeren Förderstrom im Normalbetrieb geringere Druckverluste im Netz anfallen und der Druck im gesamten Netz höher liegt als während des Betriebs mit maximalem Förderstrom. In dieser Druckdifferenz zwischen Normalbetrieb und Betrieb mit maximalem Förderstrom liegt das Energieeinsparpotenzial, dass durch ein erweitertes Mess- und Regelsystem ausgeschöpft werden kann.

Begreifen der Ergebnisse zum Energiebedarf der MZ_{SOLL} als Potenzial

Als Konsequenz daraus, dass das jetzige Mess- und Regelsystem nicht dazu in der Lage ist, den in den Simulationen dieser Arbeit getroffenen Annahmen zu entsprechen, sind die hier erzielten Ergebnisse in Bezug auf den elektrischen Energiebedarf der MZ_{SOLL} als ein Potenzial zu verstehen, dass durch die Einrichtung eines entsprechenden Mess- und Regelsystems ausgeschöpft werden kann. Deshalb ist nicht damit zu rechnen, dass sich der Energiebedarf nach der Umstellung des Betriebs auf den SOLL-Zustand ohne die Erweiterung des Mess- und Regelsystems auf dem Niveau der hier ermittelten Ergebnisse einstellen wird.

Erweitertes Mess- und Regelsystem

Vorrangiges Ziel bei der Versorgung der MZ_{SOLL} muss es sein, den Netzdruck bei mindestens 3,4 bar zu halten, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Durch die Erweiterung des Mess- und Regelsystems kann die Möglichkeit geschaffen werden, den Netzdruck unter Einhaltung der Versorgungssicherheit so niedrig wie möglich zu halten, um das oben genannten vorhandene Energieeinsparpotenzial auszuschöpfen. Dazu muss die Steuerung der Pumpenförderleistung anhand des Netzdrucks erfolgen.

Eine Möglichkeit wäre, einige der 21 in den HZs vorhandenen und über Kabel an die QVL angebundenen Druckmesser zur Erweiterung des Mess- und Regelsystems zu nutzen. Die Druckmesser sind im Jahreswasserbericht 2013 auf S. 23 gelistet (ENTEGA 2014). Über die QVL könnten die Pumpen der DEAs mit Hilfe einer automatischen Pumpensteuerung, den gemessenen Förderströmen der DEAs und den im Netz gemessenen Drücken so geregelt werden, dass der Netzdruck 3,4 bar nicht unterschreitet. Der führende Druckgeber, an dem sich die Pumpensteuerung ausrichten sollte, muss im höchsten Punkt des Netzes (Zeyerweg) liegen. Ein potenzieller Druckmesser befindet sich bereits in der Nähe. Wenn dort der Mindestdruck von 3,4 bar gehalten wird, sollten alle anderen Druckmesser einen höheren Druck anzeigen.

Für plötzlich auftretende Druckabfälle muss ein Maßnahmenplan entwickelt werden, durch den die Versorgungssicherheit weiterhin gewährleistet werden kann. Fällt der Druck an einem oder mehreren benachbarten Druckmessern im Vergleich zu den restlichen stark ab, sollte ein Alarm ausgelöst werden. Bleibt die Förderleistung trotz des Druckabfalls gleich, liegt wahrscheinlich eine Störung im System vor, die behoben werden muss. Steigt mit dem Druckabfall die Förderleistung der Pumpen jedoch an, liegt wahrscheinlich ein realer Druckabfall vor, für den es unterschiedliche Erklärungen geben kann. Ein sprunghaft gestiegener Verbrauch ist unwahrscheinlich, da keine größeren Verbraucher an die MZ_{SOLL} angeschlossen sind, die durch z.B. die Aufnahme ihrer Produktion plötzlich hohe Mengen Wasser benötigen. Allerdings könnte ein Feuerwehreinsatz für eine hohe Löschwasserentnahme und dadurch für den Druckabfall sorgen. Außerdem könnte ein Rohrbruch vorliegen, über den große Wassermengen austreten, sodass der Druck in diesem Bereich stark abfällt. Solange nicht sicher ist, dass eine Störung vorliegt, sollte in allen Fällen die Förderleistung erhöht werden, um die Rohrleitungen im Falle eines Rohrbruchs vor Verschmutzung und Lufteintritt zu schützen oder die Feuerwehr mit dem nötigen Druck zu versorgen. Durch einen anschließenden Anruf bei der Feuerwehr kann die Löschwasserentnahme als Ursache des Druckabfalls bestätigt oder ausgeschlossen werden. Wird diese ausgeschlossen, liegt wahrscheinlich ein Rohrbruch vor, der behoben werden sollte.

5.2.2. Lastprofil

Im Folgenden wird die Aussagekraft des in dieser Arbeit verwendeten, extrapolierten Lastprofils diskutiert. Da die Plausibilität der für die Extrapolation verwendeten Fördermenge der HZ3a nicht gegeben ist, werden die Auswirkungen einer fehlerhaften Fördermenge auf das Lastprofil und den späteren Energiebedarf der MZ_{SOLL} diskutiert.

Danach wird eine Einordnung der dem Lastprofil zu Grunde liegenden Jahresfördermenge 2013 in den üblichen Wasserverbrauch der Stadt Darmstadt vorgenommen und die Entwicklung der Wasserabgabe in der MZ_{SOLL} diskutiert. In einer abschließenden Gesamtbetrachtung werden die diskutierten Einflussfaktoren aufgegriffen und die Aussagekraft des Lastprofils bewertet.

Auswirkungen fehlerhafter Fördermenge HZ3a auf das Lastprofil

Ein Ergebnis der in Unterkapitel 4.1.2 dargestellten Plausibilitätsprüfung der Fördermengen ist, dass die in die HZ3a geförderten Mengen um bis zu 10 % niedriger sein könnten, als für die Ermittlung des Energiebedarfs des ALT-Zustandes und die Extrapolation des Lastprofils angenommen wird. Sänken die Fördermengen der HZ3a unter Abzug der aus dem ÜSV HEIH ausgespeisten Fördermengen von 562.000 m³ auf 508.000 m³, sänke auch der für die MZ_{SOLL} angenommene Zonenverbrauch um 2,8 % von 1.883.000 m³/a auf 1.829.000 m³/a. Damit sänke auch der für die MZ_{SOLL} prognostizierte Energiebedarf um ca. 2,8 %. Für den nach der Pumpensteuerung HEIN+OETI (η opt.) ermittelten Energiebedarf bedeutete dies eine Verringerung von 247.000 kWh/a auf 240.000 kWh/a.

Einordnung der Wasserabgabe 2013 in den üblichen Wasserverbrauch der Stadt Darmstadt und Entwicklung der zukünftigen Wasserabgabe der MZ_{SOLL}

In Unterkapitel 4.2.2 wird festgestellt, dass die Wasserabgabe an Haushalt und Kleingewerbe im gesamten Stadtgebiet der Stadt Darmstadt im Jahr 2013 im Vergleich zu den vier Vergleichsjahren leicht erhöht war. Da das für die Prognose des zukünftigen Energiebedarfs der MZ_{SOLL} herangezogene Lastprofil auf dem Jahr 2013 basiert, könnte der Eindruck entstehen, dass der zukünftige Wasserbedarf und damit auch der Energiebedarf der MZ_{SOLL} überschätzt wird. Dem steht der Einfluss steigender Einwohnerzahlen der Stadt Darmstadt gegenüber. Laut van den Busch soll die Einwohnerzahl der Stadt Darmstadt bis zum Jahr 2030 auf 153.000 steigen (van den Busch 2010, S. 18). Im Vergleichsjahr 2013 waren es 148.483 (Hessisches Statistisches Landesamt 2015). Eine weitere Rolle für die Entwicklung der Wasserabgabe spielt die Entwicklung des spezifischen Wasserbedarfs. Kersting und Werbeck gehen davon aus, dass der seit Mitte der 1980er Jahre sinkende spezifische Wasserverbrauch auch in Zukunft sinken wird. Sie führen dafür die Sanierung von Bädern, den Einsatz wassersparender Geräte und die Nutzung von Regenwasser für Bewässerungszwecke an (Kersting und Werbeck, S. 18).

Es stehen sich also zwei gegenläufige Tendenzen gegenüber, deren Ausprägung über die tatsächliche Entwicklung der Wasserabgabe entscheiden wird. Das WVU selbst geht von einer langfristig gleichbleibenden Wasserabgabe für die MZ_{SOLL} aus. Die städtebaulichen Veränderungen lägen vorwiegend in der NZ. Für das Gebiet der MZ_{SOLL} seien lediglich die Entwicklungsgebiete der Cambrai-Fritsch und der Jefferson Kaserne von Belang. Das WVU geht davon aus, dass der dadurch steigende Wasserbedarf, den sinkenden spezifischen Wasserbedarf der Einwohner kompensiert (ENTEGA 2015).

Abschließend soll festgehalten werden, dass das zur Erstellung des Lastprofils herangezogene Jahr 2013 tendenziell zu den verbrauchsstärkeren Jahren zählt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich die zukünftige Entwicklung der Wasserabgabe schwer vorhersagen lässt. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Wasserabgabe der MZ_{SOLL} in etwa gleich bleiben wird. Für die Entwicklung des ermittelten Energiebedarfs der MZ_{SOLL} wird deshalb geschlussfolgert, dass dieser mittelfristig innerhalb der jährlichen Schwankungen der Wasserabgabe auf dem gleichen Niveau verbleiben sollte.

Abschließende Bewertung der Aussagefähigkeit des Lastprofils

Das Lastprofil der MZ_{SOLL} basiert auf der Extrapolation der für die HZs 2a und 3a ermittelten Fördermengen des Jahres 2013. Diese belaufen sich auf 1.292.000 m³. Abzüglich der über das ÜSV HEIH in die NZ ausgespeisten Mengen und zuzüglich des im Rahmen der Umstellungsmaßnahmen an die MZ_{SOLL} angeschlossenen Studentenwohnheimes Karlshof beläuft sich der zukünftige Verbrauch der MZ_{SOLL} auf 1.883.000 m³. Somit werden die Stundenwerte von 69 % des Zonenverbrauchs auf die restlichen 31 % extrapoliert. Dies wird als eine solide Basis für eine vertrauenswürdige Extrapolation angesehen.

Es wurde bereits festgestellt, dass die möglicherweise fehlerhaften Fördermengen der HZ3a insgesamt zu einer Verringerung der Jahresfördermenge von 2,8 % führen könnten. Diese Verringerung wird als so gering bewertet, dass die Aussagekraft des Lastprofils dadurch als nicht gefährdet angesehen wird. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die Wasserabgabe der MZ_{SOLL} in Zukunft etwa gleich bleiben wird.

In der Gesamtbetrachtung wird das hier verwendete Lastprofil aus dem Jahr 2013 als solide bewertet. Das Lastprofil spiegelt dabei ein tendenziell verbrauchsstärkeres Jahr wider und kann seine Aussagekraft wahrscheinlich auch in Zukunft bewahren.

5.2.3. Vordrucksituation der DEAs

Im Folgenden werden die Annahmen diskutiert, die einen Einfluss auf die Vordrücke der DEAs haben. Dabei wird zuerst auf die Methodik eingegangen, die niederzonenseitig auftretenden Druckverluste durch die Verlegung von Rohrleitungen vor den DEAs abzubilden. Weiterhin wird die Annahme gleicher Vordruckhöhen diskutiert. Abschließend werden in einer Gesamtbetrachtung die Diskussionspunkte in Bezug auf die Abbildung der Vordrucksituation im Rechnetzmodell aufgegriffen und bewertet.

Berücksichtigung der niederzonenseitig auftretenden Druckverluste

Das Vorgehen, die niederzonenseitig auftretenden Druckverluste durch die Verlegung von Rohrleitungen zu simulieren, basiert auf dem Vergleich von fünf Vordrücken, die bei ähnlichen Randbedingungen vor der DEA HEIN gemessen wurden. Dies ist nur eine kleine Stichprobe, sodass das Vorgehen keinen Anspruch auf Repräsentativität haben kann. Eine ausführlichere Analyse ist im Rahmen der Arbeit jedoch nicht möglich. Des Weiteren können potenziell unterschiedliche Anbindungen der DEAs an die NZ nicht berücksichtigt werden, da im Rechnetzmodell vor jede DEA die gleichen Rohrleitungen zur Vordruckabsenkung verlegt werden. Diese werden auf Basis der Vordruckentwicklung der DEA HEIN ermittelt. Eine eigene Ermittlung für die DEAs OETI und MATH führt aufgrund der niedrigen Förderströme und dadurch geringen Vordruckabsenkungen nicht zu verwertbaren Ergebnissen.

Annahme gleicher Vordruckhöhen

Aufgrund der vielen unterschiedlichen Faktoren, die die Vordrücke beeinflussen, wird bei den Simulationen für alle drei DEAs eine Vordruckhöhe von 185 m angenommen. Diese Maßnahme vereinfacht die dynamischen Netzbedingungen soweit, dass potenzielle Vordruckunterschiede nicht berücksichtigt werden können.

Dabei deutet die Auswertung der Messwerte darauf hin, dass die Vordruckhöhen zur Mittagszeit vor der DEA HEIN stärker fallen als vor den DEAs OETI und MATH. Der Unterschied zwischen den betrachteten Tageszeiten ist, dass in der Mittagszeit mehr Wasser als zur Nachtzeit verbraucht wird. Die DEAs OETI und MATH liegen an der nordöstlichen Zonengrenze zwischen NZ und HZ. Die DEA HEIN befindet sich südlich davon zentraler in Richtung Innenstadt gelegen.

Es ist denkbar, dass im niederzonenseitigen Umfeld der DEA HEIN eine stärkere Netzbelastung durch einen höheren Wasserverbrauch während des Tages zustande kommt, als dies im niederzonenseitigen Umfeld der DEAs OETI und MATH der Fall ist. Weiterhin sind die DEAs MATH und OETI besser an den druckbestimmenden HB OBER angebunden. Die DEA HEIN wird durch eine Hauptleitung von den Wasserwerken in Pfungstadt und Eschollbrücken versorgt.

Die stärkere Abnahme der Druckhöhe bei der DEA HEIN zu verbrauchsstarken Zeiten könnte durch den langen Transportweg von den Wasserwerken zur DEA begründet sein. Der Transportweg vom HB OBER zu den DEAs OETI und MATH ist dagegen kürzer als vom HB OBER zur DEA HEIN. Die Druckverluste auf dieser Strecke sollten dort niedriger ausfallen und einen stärkeren Vordruckabfall im Umfeld der DEA HEIN zur Mittagszeit erklären. Die aufgetretenen Schwankungen sind für eine Berücksichtigung in der Methode jedoch zu stark und unbeständig.

Abschließende Bewertung der in den Simulationen abgebildeten Vordrucksituation

Sowohl die Methode zur Berücksichtigung der niederzonenseitig auftretenden Druckverluste als auch die Ansetzung des gleichen Vordrucks für die Simulationen führen dazu, dass im Rechnernetzmodell gleiche Vordruckverhältnissen abgebildet werden. Dabei deutet die Auswertung der Messwerte darauf hin, dass keine gleichen Vordruckverhältnisse herrschen. Wie ausgeprägt diese sind und ob diese damit einen Einfluss auf die Entwicklung einer energieeffizienten Pumpensteuerung nehmen könnten, kann in dieser Arbeit nicht festgestellt werden. Deshalb ist es zumindest fragwürdig, ob die Vordrucksituation im Rechnernetzmodell hinreichend genau abgebildet wird.

5.2.4. Pumpensteuerung

Die Ergebnisse lassen keine konkreten Empfehlungen zur Auswahl einer Pumpensteuerung zu. Es bleibt lediglich festzuhalten, dass ein Wasserbedarf, der durch den Betrieb einer einzelnen Pumpe gedeckt werden kann, auch durch eine einzelne Pumpe gedeckt werden sollte. Weiterhin wird festgestellt, dass bei einem Wasserbedarf von $Q = 375 \text{ m}^3/\text{h}$ wesentlich mehr Energie benötigt wird, wenn die Förderung über eine einzelne DEA erfolgt, als wenn der Förderstrom auf zwei DEAs aufgeteilt wird. Differenziertere Ergebnisse können in dieser Arbeit nicht geliefert werden.

Dies lässt sich auf methodische Ursachen zurückführen. Die von der Kalibrierung des Rechnernetzmodells vorgegebene Genauigkeit der Simulationen verhindert die Ermittlung wesentlicher Unterschiede zwischen dem ermittelten Energiebedarf der unterschiedlichen Pumpensteuerungen. Des Weiteren können die bereits oben diskutierten, potenziell vorhandenen Vordruckunterschiede vor den DEAs nicht in das Rechnernetzmodell aufgenommen werden. Außerdem verhindert die Klassifizierung der Lastfälle in lediglich fünf Klassen eine differenzierte Betrachtung der an den DEAs anfallenden Förderströme und die davon abhängige Entwicklung des Wirkungsgrades. Diese methodischen Eigenheiten werden in diesem Unterkapitel genauer ausgeführt. Weiterhin wird durch die Beschreibung der Methodik von Hähnlein (2008) ein alternativer Lösungsweg aufgezeigt. Dort gelingt durch die Anwendung eines Algorithmus‘ in MATLAB die Beschreibung von 20 Lastfällen und deren optimaler Pumpensteuerung, sodass eine differenzierte Berücksichtigung des Wirkungsgradverlaufs der Pumpen möglich ist. Im Anschluss daran wird die Methodik von Hähnlein mit der in dieser Arbeit verwendeten Methodik verglichen und die größten Unterschiede herausgearbeitet. Abschließend wird erläutert, welche Schritte vollzogen werden müssten, um eine Betriebsoptimierung in Anlehnung an Hähnlein (2008) durchzuführen.

Kalibrierung des Rechnernetzmodells und deren Auswirkung auf die Größe der Vertrauensbereiche

Durch die Kalibrierung des Rechnernetzmodells auf eine Genauigkeit der simulierten Druckhöhen von $\pm 2 \%$ von $p_{ruh,max}$ ist die Genauigkeit der mit Hilfe der Simulationen ermittelten Förderhöhen der DEAs vorgegeben. Diese Genauigkeit setzt sich bis zur Ermittlung des Energiebedarfs der MZ_{SOLL} fort und wird durch die Vertrauensbereiche wiedergegeben. Letztendlich geben die Vertrauensbereiche für jeden Lastfall jeder Pumpensteuerung einen Bereich vor, indem die ermittelten Unterschiede des Energiebedarfs zwischen den Pumpensteuerungen als unwesentlich eingestuft werden. Dieser Bereich ist mit ca. $\pm 5 \%$ des Energiebedarfs in den meisten Fällen zu groß, als dass eine optimale Pumpensteuerung ausgewählt und empfohlen werden könnte.

Abbildung der Vordrucksituation vor den DEAs

Die Simulationen im Rechnernetzmodell basieren auf der Annahme, dass die Vordrucksituation vor den DEAs gleichwertig ist. Wie im vorherigen Unterkapitel 5.2.3 bereits diskutiert, ist es zumindest fragwürdig, ob die Abbildung der Vordrucksituation auf diese Weise hinreichend genau ist und auf dieser Grundlage eine energieeffiziente Pumpensteuerung entwickelt werden kann.

Klassifizierung der Förderströme und deren Auswirkung auf die Wirkungsgrade

Bei der Klassifizierung der Förderströme ist die Auswahl der Klassenbreite und Klassenmitten nach pragmatischen Gesichtspunkten getroffen worden. Von dieser Auswahl sind die erzielten Pumpenwirkungsgrade abhängig.

Wird eine große Klassenbreite gewählt, werden viele unterschiedliche Förderströme in einer Klasse zusammengefasst und auf den der Klassenmitte zugehörigen Förderstrom reduziert. Dies hat zur Folge, dass die vom Förderstrom abhängigen Pumpenwirkungsgrade η_{PU} dieser Klassen ebenfalls auf den Pumpenwirkungsgrad der Klassenmitte reduziert werden. Da durch den speziellen Wirkungsgradverlauf einer Pumpe in einer Klasse viele unterschiedliche Pumpenwirkungsgrade zu einem zusammengefasst werden, sinkt die Aussagekraft des dadurch ermittelten Energiebedarfs mit der Größe der Klassenbreite.

Wird eine kleine Klassenbreite gewählt, entstehen viele Klassen, für die jeweils pro Pumpensteuerung eine einzelne Simulation durchgeführt werden muss. Damit steigt der zur Ermittlung der Förderhöhen benötigte Zeitaufwand. Es muss also eine Abwägung zwischen Aussagekraft und Zeitaufwand der Berechnungen getroffen werden. In dieser Arbeit wird die Klassenbreite so gewählt, dass fünf Klassen entstehen.

Werden die Klassenmitten so gewählt, dass sie in hohen Pumpenwirkungsgradbereichen liegen, wird ein geringerer Gesamtenergiebedarf ermittelt, als wenn die Klassenmitten in niedrigeren Pumpenwirkungsgradbereichen liegen. In dieser Arbeit werden die Klassenmitten so gewählt, dass möglichst Pumpenwirkungsgrade größer 75 % erzielt werden (vgl. Tabelle 20, Anhang S. XXXII). Im späteren Betrieb der Pumpen werden diese Pumpenwirkungsgrade durch den schwankenden Wasserbedarf nicht immer zu realisieren sein. Zur Beurteilung der Auswirkungen einer Verschlechterung des Pumpenwirkungsgrades auf die Entwicklung des Energiebedarfs, wird in Unterkapitel 4.5.4 eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Diese Analyse ist eine allgemeine Betrachtung der Auswirkungen eines schlechten Pumpenwirkungsgrades (70 %) auf den Energiebedarf und gibt keinen Hinweis auf die Vorteilhaftigkeit bestimmter Pumpensteuerungen, weshalb sie für die Auswahl einer Pumpensteuerung nicht von Nutzen ist.

Betriebsoptimierung nach Hähnlein (2008)

Ebenfalls mit der Betriebsoptimierung von Reinwasserpumpen in einem Verteilnetz beschäftigt sich Hähnlein in seiner Dissertation von 2008. Dazu entwickelt er mit Hilfe numerischer Algorithmen in MATLAB ein Optimierungsmodell, dass die aktuelle Hydraulik im Verteilnetz berücksichtigt. Dazu werden hydraulische Simulationen in einem Skelettmodell durchgeführt. Dieses Skelettmodell besteht aus den wichtigsten Knotenpunkten des Verteilnetzes (in seinem Fall 6,9 % aller Knoten).

In einem zweitägigen Messprogramm wurden die Druckhöhen an diesen Knotenpunkten sowie die Förderströme der Pumpen simultan gemessen und in 20 Betriebszustände (vergleichbar mit den hier verwendeten Lastfällen) diskretisiert. Für diese Betriebszustände wird mit Hilfe des Optimierungsmodells die jeweils energieeffizienteste Pumpensteuerung identifiziert.

Der Bearbeitungsalgorithmus des Optimierungsmodells wird im Folgenden kurz beschrieben. Das Skelettmodell ist im Optimierungsmodell integriert. Im Skelettmodell werden zunächst hydraulische Simulationen auf Basis der hinterlegten Netzparameter (z.B. Pumpenkennlinien), der simultan gemessenen Förderströme der Pumpwerke sowie der an den ausgewählten Knotenpunkten gemessenen Druckhöhen durchgeführt. Diese Simulationen werden mit Hilfe des Knoten-Strang-Verfahrens gelöst. Danach ermittelt der Algorithmus mit Hilfe der relevanten hydraulischen Daten unter Einhaltung der Zielfunktion (z.B. Minimierung des Pumpenenergiebedarfs) und aller Nebenbedingungen (z.B. Netzdruckhaltung, Mindestdrehzahl der Pumpen, u.v.m.) eine Pumpensteuerung. Diese wird durch eine weitere hydraulische Simulation auf ihre Zulässigkeit hin überprüft und abgespeichert. Auf diese Weise wird für jeden der 20 diskretisierten Betriebszustände die optimale Pumpensteuerung ermittelt.

Vergleich des Optimierungsmodells nach Hähnlein (2008) mit der hier verwendeten Methodik

Hähnlein gelingt durch die Automatisierung die Beschreibung von 20 Lastfällen. Im Vergleich dazu können in dieser Arbeit durch die fehlende Automatisierung lediglich fünf Lastfälle abgebildet werden. Somit ist in der Arbeit von Hähnlein eine differenziertere Berücksichtigung der Förderströme und des Wirkungsgradverlaufs der Pumpen möglich. Des Weiteren wird durch die Übertragung aller Netzparameter, Nebenbedingungen und der Zielfunktion in den Algorithmus die automatische Ermittlung einer optimalen Pumpensteuerung für jeden der 20 Lastfälle erreicht. Mit der hier verwendeten Methodik können aufgrund des hohen Zeitaufwands zur Ermittlung der Förderhöhen nur eine beschränkte Auswahl an Pumpensteuerungen mit unterschiedlicher Förderstromaufteilung auf die DEAs untersucht werden. In Verbindung mit der Beschreibung von fünf Lastfällen, ist die Ermittlung einer optimalen Pumpensteuerung in dieser Arbeit nicht möglich. Dabei ist es zweifelhaft, dass selbst durch eine differenziertere Einteilung der Lastfälle und der Untersuchung weiterer Pumpensteuerungen eine eindeutig optimale Pumpensteuerung ermittelt werden könnte.

Grund dafür sind die aus der Genauigkeit der Kalibrierung resultierenden Vertrauensbereiche, die eine Ermittlung wesentlicher Unterschiede zwischen den Pumpensteuerungen und damit eine Ermittlung einer eindeutig optimalen Pumpensteuerung verhindern. In der Dissertation von Hähnlein konnten keine Hinweise darauf gefunden werden, dass die Genauigkeit der Kalibrierung eine Rolle bei der Ermittlung der optimalen Pumpensteuerung spielt. „Die Abweichungen zwischen Skelett-Modell, geeichtem Simulationsmodell und Messwerten waren bei allen untersuchten Lastfällen $< 2 \text{ m}^3$ “ (Hähnlein 2008, S. 180).

Damit liegt die Genauigkeit des Skelettmodells auf einem ähnlichen Niveau wie die Genauigkeit des in dieser Arbeit verwendeten Rechnernetzmodells. Ob die von Hähnlein ermittelten, optimalen Pumpensteuerungen bei einer Anwendung der hier verwendeten Vertrauensbereiche wesentlich energieeffizienter sind als alternative Pumpensteuerungen, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden. Es ist denkbar, dass alternative Pumpensteuerungen in der Realität energieeffizienter sind als die als optimal ermittelten Pumpensteuerungen. Dies könnte zustande kommen, wenn die Strömungsverhältnisse in manchen Teilen des Skelettmodells im Rahmen der Genauigkeit so stark von den wirklichen Strömungsverhältnissen abweichen, dass die Förderung über eine DEA gegenüber der Förderung über einer anderen DEA in der Simulation ungerechtfertigter Weise energetisch überlegen ist.

Des Weiteren gibt es einen Unterschied zwischen der in dieser Arbeit verwendeten Datengrundlage zur Erstellung des Lastprofils und der von Hähnlein verwendeten Datengrundlage. Zur Erstellung des in dieser Arbeit verwendeten Lastprofils werden die in das Gebiet der MZ_{SOLL} geförderten Mengen stundenweise über ein gesamtes Jahr ermittelt. Die 20 Betriebszustände auf denen die Pumpensteuerung von Hähnlein basiert, wurden in einem eineinhalbtägigen Messprogramm ermittelt. Hähnlein merkt an, dass der „Zeitraum des Messprogramms [...] mit 1,5 Tagen viel zu kurz [ist], um Aussagen über die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Betriebszustände für ein Jahr treffen zu können“ (Hähnlein 2008, S. 185). Damit sind konkrete Aussagen über das aufs Jahr bezogene Energieeinsparpotenzial nur durch die in dieser Arbeit verwendete Methodik möglich. Die Qualität der ermittelten Pumpensteuerung sollte allerdings nicht davon betroffen sein.

Die für diese Arbeit relevante Problematik der Vordrucksituation ergibt sich für Hähnlein nicht. Die Einspeisung in das Skelettmodell erfolgt über drei Wasserwerke, an denen der Vordruck in gewissem Rahmen konstant bleiben sollte.

Durchführung einer Betriebsoptimierung mittels des Optimierungsmodells nach Hähnlein (2008)

Zur Durchführung einer Betriebsoptimierung mit Hilfe des von Hähnlein verwendeten Optimierungsmodells für die in dieser Arbeit betrachtete MZ_{SOLL} müssen die hier beschriebenen Schritte vollzogen werden.

Es wird davon ausgegangen, dass die Betriebsoptimierung erst nach der Umstellung auf den Regelbetrieb der MZ_{SOLL} durchgeführt wird. Zur Durchführung einer Betriebsoptimierung sollte wie folgt vorgegangen werden:

1. Es muss ein Skelettmodell aus dem vorhandenen Rechnernetzmodell entwickelt werden. Dazu müssen die entsprechenden Skelett-Knotenpunkte bestimmt und in einem Messprogramm simultane Druckmessungen an diesen Knoten über einen Zeitraum von mindestens ein bis zwei Tagen durchgeführt werden. Die dazugehörigen Pumpenförderströme der DEAs werden automatisch aufgezeichnet und müssen in das Skelettmodell integriert werden. Die Lastkurve des Messprogramms wird danach in ausreichend viele Lastfälle/Betriebszustände (z.B. 20; siehe Hähnlein) diskretisiert. Das ein- bis zweitägige Messprogramm reicht aus, um eine Pumpensteuerung für die am häufigsten auftretenden und damit energetisch relevanten Lastfälle zu entwickeln. Weiterhin müssen netzspezifische Parameter (z.B. Pumpenkennlinien) in das Optimierungsmodell integriert werden. Abschließend sollte das Skelettmodell anhand des geeichten Rechnernetzmodells und den Messwerten überprüft werden (vgl. Hähnlein 2008, S. 180).
2. Der Algorithmus des Optimierungsmodells muss um die netzspezifischen Nebenbedingungen erweitert werden. Dazu zählen unter anderem die minimale und maximale Druckhöhe im Netz und die Näherungsfunktionen für den spezifischen Energieverbrauch der Pumpen. Ob dazu der bereits durchgeführte Leistungstest der DEA OETI ausreichend ist und – wenn ja – die Ergebnisse auf die Pumpen der DEA MATH (falls diese saniert wird) übertragen werden können, muss vorher geklärt werden.
3. Wenn der beim obigen Vergleich beider Methodiken angesprochene Vertrauensbereich zur Bestimmung wesentlicher Unterschiede zwischen den ermittelten Pumpensteuerungen eines Lastfalls berücksichtigt werden soll, muss der Algorithmus um eine Funktion der Vertrauensbereiche erweitert werden. Der Algorithmus sollte die für einen Lastfall bestimmten alternativen Pumpensteuerungen, die im Rahmen des Vertrauensbereichs von der als optimal ermittelten Pumpensteuerung liegen, ebenfalls speichern. Aus den gespeicherten Pumpensteuerungen kann durch Tests für jeden Lastfall die Pumpensteuerung ausgewählt werden, die in der Realität den niedrigsten Energiebedarf vorweist.
4. Sollte sich herausstellen, dass die Vordrucksituation einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung einer energieeffizienten Pumpensteuerung hat, sollte diese nach Möglichkeit so gut wie möglich im Optimierungsmodell mit abgebildet werden. Um genauere Informationen über die Vordrücke zu erlangen, könnten Simulationen im Rechnernetzmodell der NZ oder ein Messprogramm durchgeführt werden.

5.3. Diskussion der Ergebnisse zur Investitionsrechnung

Das Ergebnis der Investitionsrechnung ist, dass das WVU durch die Investition in die DEA MATH mit einer jährlichen Vermögensänderung zwischen - 3.401 €/a und - 7.452 €/a rechnen muss. Im folgenden Unterkapitel wird dieses Ergebnis vor dem Hintergrund der verwendeten Annuitätenmethode diskutiert.

Die Annuitätenmethode basiert auf der Kapitalwertmethode. „Daher gelten dieselben Kritikpunkte wie für die Kapitalwertmethode“ (Becker 2012, S. 65). Die Kritikpunkte liegen nach Becker in der Abschätzung der zukünftigen Zahlungsströme sowie in der Annahme eines vollkommenen Kapitalmarktes.

Zuerst werden die von Becker genannten Kritikpunkte in diesem Unterkapitel diskutiert. In einer abschließenden Gesamtbetrachtung werden die diskutierten Kritikpunkte nochmals aufgegriffen und das Ergebnis der Investitionsrechnung bewertet.

5.3.1. Zukünftige Zahlungsströme und Strompreisentwicklung

Becker geht davon aus, dass die Richtigkeit der Schätzung weit in Zukunft liegender Zahlungsströme „durch große Unsicherheit belastet“ ist (Becker 2012, S. 62). Als jährlicher Zahlungsstrom wird in dieser Arbeit die Differenz aus den Kosten für Wartung/Instandhaltung und den jährlichen Einsparungen an Pumpenergiekosten angesetzt. Weil die Preisentwicklung beider Faktoren über den Zeitraum der Investitionsrechnung von 40 Jahren nicht angemessen abgeschätzt werden kann, werden über den gesamten Zeitraum die Kosten zugrunde gelegt, die bei einer heutigen Realisierung der Maßnahme anfallen würden. Um eine gewisse Absicherung des Ergebnisses zu erhalten, wird eine Sensitivitätsanalyse bezüglich des Strompreises durchgeführt. Die Annahme eines Strompreises von 0,5 €/kWh anstelle der heute vom WVU zu bezahlenden 0,234 €/kWh verringert die mittlere Annuität lediglich von - 5.427 €/a auf - 3.751 €/a. Diese geringe Verbesserung des Ergebnisses lässt nicht erwarten, dass steigende Energiekosten zur Rentabilität der Investition führen.

In Bezug auf die Wartungs- und Instandhaltungskosten wird nicht davon ausgegangen, dass diese langfristig gesehen sinken werden (ENTEGA 2015). Da die mittlere Annuität unter dieser Annahme durch eine Entwicklung der Wartungs- und Instandhaltungskosten nur noch weiter sinken würde, wird auf eine Sensitivitätsanalyse dieser Kosten verzichtet.

5.3.2. Zinssatz und vollkommener Kapitalmarkt

Die angewendete Methode geht von einem vollkommenen Kapitalmarkt aus, bei dem zu einem einheitlichen Zinssatz „beliebig hohe Beträge aufgenommen und angelegt werden können (identischer Soll- und Habenzins). So lassen sich beispielsweise die Einzahlungsüberschüsse zum Kalkulationszinssatz wieder anlegen, was nicht der Realität entspricht“ (Becker 2012, S. 62). Da der jährliche Zahlungsstrom durch die im Vergleich zu den Einsparungen an Pumpenergiekosten hohen Kosten für Wartung/Instandhaltung negativ ist, bleibt das von Becker beschriebene Szenario der Anlage von Einzahlungsüberschüssen aus. Neben der Kritik des einheitlichen Zinssatzes werden im vollkommenen Kapitalmarkt weitere Vereinfachungen getroffen, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Da sich der für interne Rechnungen des WVUs angenommene, langfristige Zinssatz von 6 % bewährt hat, wird die Methode in dieser Hinsicht als solide bewertet.

5.3.3. Abschließende Bewertung der Investitionsrechnung

Der Schwäche der Annuitätenmethode, zukünftige Zahlungsströme abzuschätzen, wird teilweise durch die Sensitivitätsanalyse in Bezug auf den Strompreis begegnet. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass der Strompreis keinen bedeutenden Einfluss auf die jährliche Vermögensänderung hat, die durch die Tötigung der Investition entsteht. Die zukünftigen Zahlungsströme für Wartungs- und Instandhaltungskosten werden nicht durch eine Sensitivitätsanalyse abgesichert. Es wird nicht davon ausgegangen, dass diese Kosten in Zukunft sinken werden. Durch gleichbleibende oder steigende Wartungs- und Instandhaltungskosten wird die Annuität entweder gleich bleiben oder weiter sinken.

In diesem Fall trifft Becker's Kritik an der Annahme des vollkommenen Kapitalmarktes nicht zu, da keine Einzahlungsüberschüsse angelegt werden können. Das Ergebnis kann also durch die Annahme gleich hoher Zinssätze nicht beeinflusst werden.

In der Gesamtbetrachtung wird das Ergebnis der hier getätigten Investitionsrechnung zur Ermittlung der jährlichen Vermögensänderung des WVU als solide bewertet. Bei Durchführung der Investition muss mit einer jährlichen Vermögensänderung zwischen - 3.401 €/a und - 7.452 €/a gerechnet werden. Potenziell steigende Wartungs- und Instandhaltungskosten werden dabei nicht berücksichtigt. Die Annuität kann auch nicht durch eventuell steigende Strompreise in einen positiven Geldbetrag gewendet werden. Deshalb wird die Integration der DEA MATH aus wirtschaftlicher Sicht als nicht vorteilhaft angesehen.

6. Handlungsempfehlungen

In diesem Kapitel werden die auf den diskutierten Ergebnissen basierenden Handlungsempfehlungen an das WVU vorgestellt.

Dabei wird dem WVU zuerst empfohlen die Druckmesser und Wasserzähler in Zukunft regelmäßig zu eichen (Unterkapitel 6.1) und das Gebiet der HZ3a auf Undichtigkeiten und schadhafte Rohrleitungen hin zu untersuchen (Unterkapitel 6.2).

Weiterhin wird dargelegt, unter welchen Umständen Investitionen in ein erweitertes Mess- und Regelsystem sowie der Entwicklung einer Pumpensteuerung getätigt werden sollten (Unterkapitel 6.3). Anschließend wird erläutert, nach welchen Kriterien über die Investition in die Sanierung der DEA MATH (Unterkapitel 6.4) entschieden werden sollte.

Abschließend werden Empfehlungen zur Suche und Ausnutzung weiterer Optimierungspotenziale gegeben (Unterkapitel 6.5) und Vorschläge in Bezug auf die Implementierung des EnMS ISO 50001 ausgesprochen (Unterkapitel 6.6).

6.1. Druckmesser und Wasserzähler

Auch nach Rücksprache mit der *Hessenwasser*, die einige der für diese Arbeit relevanten Messeinrichtungen betreut, konnte nicht festgestellt werden, wann die Druckmesser und Wasserzähler zuletzt geeicht wurden. Die meisten Druckmesser und Wasserzähler werden durch die Umstellungsmaßnahmen demontiert oder verlieren durch die Stilllegung der Anlagen ihre Funktion. Für das WVU bleibt trotzdem die Möglichkeit, die verbleibenden alten und die dazukommenden neuen Messgeräte in Zukunft so zu unterhalten, dass der Zustand der Geräte laufend bekannt ist.

Auch wenn Wasserzähler im Rahmen unternehmensinterner Durchflussmessungen nicht geeicht werden müssen (DVGW W 400-3, S. 38) und die Ergebnisse darauf hindeuten, dass einige der installierten Wasserzähler eine ausreichende Genauigkeit besitzen, sollte eine regelmäßige Überprüfung oder Eichung der Geräte in Betracht gezogen werden. So wird in DVGW W 392 festgestellt, dass die „genaue Messung der Rohrnetzeinspeisung [...] von großer Bedeutung für eine zuverlässige Wassermengenbilanz“ ist (DVGW W 392, S. 16). Deshalb sollten die Messgeräte auf Abweichungen überprüft werden und bei festgestellten Abweichungen Korrekturen vorgenommen werden (vgl. DVGW W 392, S. 16).

Der Fall der nicht plausiblen Fördermengen der HZ3a zeigt, dass sich die Anzahl der möglichen Fehlerquellen erweitert, sobald die Genauigkeit der gemessenen Durchflussmengen nicht garantiert werden kann. Durch geeichte Wasserzähler, über deren Genauigkeit Klarheit besteht, wird die Ursachenforschung in Bezug auf die vorliegende Differenz zwischen geförderter und abgerechneter Menge vereinfacht.

Der Fall der nicht plausiblen Vordruckhöhen der DEAs zeigt, dass die gemessenen Werte der Druckmesser zur Beantwortung komplexer hydraulischer Fragestellungen nur eingeschränkt verwertet werden können. Für jeden Druckmesser sollte die geodätische Höhe, in der er angebracht ist, bekannt sein. Außerdem sollte eine regelmäßige Überprüfung oder Eichung der Geräte in Betracht gezogen werden. Somit können andere Fehlerquellen, wie die in dieser Arbeit als mögliche Fehlerquelle diskutierte mangelhaft angelegte Offsetspannung, ausgeschlossen werden (siehe Anhang S. XL).

6.2. Unplausible Fördermengen der HZ3a

Die Differenz von 10 % zwischen den 2013 in die HZ3a geförderten Mengen zu den um die Wasserverluste korrigierten im Jahr 2012 abgerechneten Mengen kann in dieser Arbeit nicht erklärt werden. In der in Unterkapitel 5.1.3 geführten Diskussion werden ungenau messende Wasserzähler sowie scheinbare oder reale Wasserverluste wie Undichtigkeiten und schadhafte Rohrleitungen für die hohe Differenz zwischen geförderter und abgegebener Menge diskutiert.

Vom WVU sollte der Versuch unternommen werden, die Ursache dieser unplausiblen Differenz zu ermitteln. Da die DMA HEIN HZ3a, das ÜSV HEIH sowie die DEAs MATH und OBER durch die Umstellung auf den SOLL-Zustand entfallen, wird eine Eichung der dort angebrachten Wasserzähler als nicht sinnvoll erachtet.

Es bleibt, die HZ3a auf zu hohe Wasserverluste hin zu untersuchen. Dass die zu den scheinbaren Wasserverlusten zählenden Abgrenzungs- und Schleichverluste an Hauswasserzählern der Grund für die Unstimmigkeit sind, wird nach der in Unterkapitel 5.1.3 geführten Diskussion für unwahrscheinlich gehalten. Deshalb sollte das WVU auf die in DVGW W 392 beschriebenen Verfahren und Maßnahmen zur Überwachung und Reduzierung von realen Wasserverlusten zurückgreifen. Dort werden als konkrete Maßnahmen die Dichtheitsmessung, Ermittlung der Wasserverluste durch Zuflussmessung und Leckortungsmethoden beschrieben (DVGW W 392, S. 20 ff).

6.3. Investition in erweiterte Mess- und Regeltechnik sowie Entwicklung einer Pumpensteuerung

In Unterkapitel 5.2.1 wird erläutert, warum nicht zu erwarten ist, dass sich die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse zum elektrischen Energiebedarf der MZ_{SOLL} sofort nach Umstellung des Betriebs auf den SOLL-Zustand einstellen werden. Diese sollten lediglich als ein Potenzial begriffen werden, dass durch eine zusätzliche Erweiterung des Mess- und Regelsystems ausgeschöpft werden kann.

Nach ein- bis zweijährigem Betrieb sollten genug Daten und Erfahrungen vorhanden sein, um den durchschnittlichen, jährlichen Energiebedarf zur Versorgung der MZ_{SOLL} abzuschätzen. Liegt der Energiebedarf deutlich über den in dieser Arbeit ermittelten Werten, sollte über eine Investitionsrechnung abgewogen werden, ob durch die Einrichtung eines erweiterten Mess- und Regelsystems (siehe Unterkapitel 5.2.1) mit entsprechend hinterlegter Pumpensteuerung (siehe Unterkapitel 5.2.4) Energiekosten in dem Maß eingespart werden können, dass die zusätzlichen Investitionen zu rechtfertigen sind.

Liegt der jährliche Energiebedarf nach der Umstellung auf den SOLL-Zustand wider Erwarten im Bereich der in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse, müssen die oben beschriebenen Investitionen aus wirtschaftlicher Sicht nicht getätigt werden, um die Versorgung der MZ_{SOLL} zu optimieren.

6.4. Investition in die Sanierung der DEA MATH

Ein monetärer Nutzen durch die Sanierung und Integration der DEA MATH in das Versorgungskonzept der MZ_{SOLL} konnte in dieser Arbeit nicht nachgewiesen werden. Der Zusatz an Versorgungssicherheit durch eine dritte DEA steht einer jährlichen Vermögensminderung des WVU von - 3.401 €/a bis - 7.452 €/a gegenüber. Um diese Vermögensminderung zu rechtfertigen, muss der Zugewinn an Versorgungssicherheit durch die dritte DEA entsprechend hoch gewertet werden. Deshalb sollte das Versorgungskonzept der MZ_{SOLL} auf die Notwendigkeit der Integration der DEA MATH zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit hin untersucht werden. Dies wird im Folgenden näher erläutert.

6.4.1. n-1-Prinzip

Nach DVGW W 400-1 A gilt als wesentlicher Faktor der Versorgungssicherheit das n-1-Prinzip. Dabei kann die „Zahl der Versorgungswege n [...] um einen verringert werden, ohne dass die Versorgung [...] unterbrochen wird. Dabei ist nach Dauer eines Ausfalls (z.B. bei Stromausfall, Instandsetzung) sowie nach dem Durchschnitts- und Spitzenlastfall (ohne Löschwasserbereitstellung) [...] zu unterscheiden.“ (DVGW W 400-1 A, S. 24).

Die vorliegende MZ_{SOLL} wird durch die beiden DEAs HEIN und OETI betrieben und ist mit einer Netzersatzanlage sowie der DMA KLAP zusätzlich ausgestattet. Das n-1-Prinzip verlangt für diese Zone, dass bei einem Ausfall einer DEA die verbliebene DEA zusammen mit der DMA KLAP die Versorgung im Spitzenlastfall gewährleisten muss. Dazu sollte eine Untersuchung mit Hilfe des Rechnernetzmodells vorgenommen werden. Als Spitzenlastfall sollte die Spitzenstunde des Spitzentages dienen. Das WVU hat mehrere Möglichkeiten, einen Wert für diese Spitzenstunde anzunehmen. Im Folgenden werden zwei Möglichkeiten erläutert.

6.4.2. Ermittlung des maßgebenden Spitzenlastfalls

Einerseits kann die Spitzenstunde aus den in dieser Arbeit für das Jahr 2013 ermittelten Fördermengen gewählt werden. Dazu wurden die von den Wasserzählern gemessenen Fördermengen der Anlagen, die die HZs 3a und 2a versorgen, verrechnet und auf die fehlenden Mengen der MZ_{ALT} und HZ3b hochgerechnet, um dem Bedarf der zukünftigen MZ_{SOLL} zu entsprechen. Die im Jahr 2013 aufgetretene Fördermenge der Spitzenstunde $Q_{h,max}$ beträgt 516,9 m³/h.

Andererseits kann die Spitzenstunde aus den für die Jahre 2014 und 2015 zur Verfügung stehenden Fördermengen der DEA OETI ausgewählt werden. Da die DEA OETI in diesem Zeitraum lediglich die Versorgung der MZ_{ALT} im Wechsel mit dem HB BÖLL übernimmt, muss diese Spitzenstunde auf den Verbrauch der MZ_{SOLL} hochgerechnet werden.

Aus diesen beiden Möglichkeiten könnte beispielsweise der höhere Wert für die Simulationen im Rechnernetzmodell angenommen werden. Die Simulationen müssen für jede DEA mit jeweils sechs Pumpen durchgeführt werden, da jeweils zwei weitere Pumpen in die DEAs eingebaut werden können. Diese Möglichkeit sollte genutzt werden, wenn sich dadurch die kostenintensive Sanierung der DEA MATH vermeiden lässt. Sollte in den Simulationen im jeweiligen Einzelbetrieb der DEAs der Mindestnetzdruck von 3,4 bar gehalten werden können, sollte auf die Investition in die DEA MATH verzichtet werden.

6.5. Weiteres Optimierungspotenzial

In Unterkapitel 4.7.2 wird festgestellt, dass in der MZ_{SOLL} kein energetisches Optimierungspotenzial vorliegt, das durch den vorzeitigen Austausch von Rohrleitungen zur Reduzierung strömungsbedingter Druckverluste unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit genutzt werden könnte. Dennoch könnte weiteres Optimierungspotenzial bestehen, dass durch die Durchführung verschiedener Maßnahmen ausgeschöpft werden kann. Im Folgenden wird empfohlen, die Möglichkeiten zur Verringerung von Wasserverlusten und die Ausnutzung von Schwachlastpreisen zu überprüfen.

6.5.1. Wasserverluste

Die in Unterkapitel 5.1.3 diskutierten Ergebnisse lassen die Vermutung zu, dass in der HZ3a vergleichsweise hohe Wasserverluste vorliegen, die durch einen Austausch beschädigter Rohrleitungen verringert werden können. Eine Verringerung der Wasserverluste ist gleichzeitig eine energetische Optimierung, da weniger Wasser zur Druckhaltung gefördert werden muss. Die Maßnahmen zur Reduzierung der Wasserverluste werden in Unterkapitel 6.2 aufgeführt.

6.5.2. Ausnutzung von Schwachlastpreisen (Nachtstrom)

Ein weiteres Optimierungspotenzial besteht in der Ausnutzung der in Unterkapitel 2.1.4 beschriebenen Schwachlastpreise. Laut unternehmensinternen Informationen werden diese im Konzern seit ca. 10 Jahren für Einzelanlagen nicht mehr genutzt. Dafür gäbe es ein neues Vertragsmodell, in dem größere Anlagen einer leistungs- und energieabnahmebezogenen Abrechnung unterlägen. Die zukünftige Änderung von einem behälterstandabhängigen hin zu einem drehzahlgeregelten Betrieb könnten diesbezüglich Veränderungen nach sich ziehen. Der Einfluss lasse sich allerdings noch nicht vorhersehen (Grüger 2015). Die Möglichkeit zur Energiekostensenkung durch die Ausnutzung von Schwachlastpreisen sollte im Zuge der Umstellungsmaßnahmen überprüft werden.

6.6. Nutzung der Ergebnisse zur Umsetzung der ISO 50001

In der Einleitung wird erläutert, dass diese Arbeit im Rahmen der Implementierung des EnMS ISO 50001 durchgeführt wird. Dadurch verpflichtet sich das WVU eine „kontinuierliche Verbesserung der energiebezogenen Leistung“ anzustreben (vgl. ISO 50001, S. 11). Um die energiebezogene Leistung zu quantifizieren, muss das WVU eine „Energieleistungskennzahl“ (EnPI) definieren (vgl. ISO 50001, S. 9). Es wird dem WVU empfohlen, dazu die Größe des in dieser Arbeit aufgeführten spezifischen Energiebedarfs, der den Energieeinsatz pro geförderter Wassermenge in kWh/m³ darstellt, auszuwählen.

Der auf S. 61 in Abbildung 13 dargestellte spezifische Energiebedarf zur Versorgung der HZs im ALT-Zustand kann demnach zur Bewertung des bisherigen Energieeinsatzes herangezogen werden. Damit kann auch in Bezug auf die Darmstädter Hochzonen der vom Gesetzgeber geforderte Nachweis erbracht werden, dass mit der Einrichtung der ISO 50001 begonnen wurde (vgl. EDL-G 2015, S. 7).

Um sich in Zukunft ohne Probleme über den bisherigen und aktuellen Energieeinsatz zur Analyse und anschließenden Verbesserung der Prozesse informieren zu können, wird im Folgenden eine Erweiterung des Datenabfragesystems vorgeschlagen.

Erweiterung des Datenabfragesystems

Bei der Datenübertragung der von den Pumpen abgerufenen Leistung und des Förderstroms von den DEAs zur QVL und LZH sollte direkt über den Quotienten der spezifische Energiebedarf gebildet und als Stundenwert abgespeichert werden. Wird der spezifische Energiebedarf als EnPI definiert, können die Mitarbeiter zur Überprüfung der energiebezogenen Leistung direkt die bisherigen und aktuellen Stundenwerte aus dem System abrufen.

7. Zusammenfassung

Das Darmstädter WVU *ENTEKA* befasst sich seit dem Jahr 2010 mit der Sanierung der Wasserversorgung der geodätisch höher gelegenen Stadtgebiete. Die Versorgung dieser Stadtgebiete wird vor der Sanierung durch mehrere Hochzonen (HZs) sichergestellt. Dieser Zustand wird als ALT-Zustand bezeichnet. Durch die Sanierung werden unter anderem vier der sieben HZs zu einer großen Mittelzone (MZ_{SOLL}) zusammengelegt. Dieser zukünftige Zustand wird als SOLL-Zustand bezeichnet. Die Sanierungsmaßnahmen werden zwischen den Jahren 2013 und 2017 stattfinden. Neben der Zonenzusammenschließung und der notwendigen Erneuerung der Pumpenanlagen umfassen die Sanierungsmaßnahmen auch eine energetische Optimierung, um den spezifischen Energiebedarf zur Versorgung des Gebiets zu reduzieren und damit die Energiekosten zu senken.

Im Rahmen der Implementierung der ISO 50001 muss das WVU seinen bisherigen sowie aktuellen Energiebedarf bewerten. Ziel dieser Arbeit ist es unter anderem, den Energiebedarf des ALT-Zustandes zu ermitteln. Für das Jahr 2013 wird ein Energiebedarf zur Versorgung der HZs im ALT-Zustand von 465.000 kWh bis 480.000 kWh ermittelt. Weiterhin muss das WVU eine „Energieleistungskennzahl“ (EnPI) definieren, um die energiebezogene Leistung zu messen. Es wird dem WVU empfohlen, dazu die Größe des spezifischen Energiebedarfs auszuwählen. Im Jahr 2013 beträgt der durchschnittlich spezifische Energiebedarf zur Versorgung der HZs 0,26 kWh/m³. Weiterhin wird empfohlen, dass Datenabfragesystem des WVUs so zu erweitern, dass Mitarbeiter zur schnellen Überprüfung der energiebezogenen Leistung den bisherigen sowie aktuellen spezifischen Energiebedarf direkt aus dem System abrufen können.

Neben dem Energiebedarf des ALT-Zustandes soll in dieser Arbeit auch der des SOLL-Zustandes (= MZ_{SOLL}) ermittelt werden. Die Berechnungen erfolgen auf Grundlage von hydraulischen Simulationen, die mit dem Rohrnetzberechnungsprogramm STANET durchgeführt werden. Das Ziel, den zukünftigen Energiebedarf zu ermitteln, kann nur teilweise erreicht werden. Da es gleichzeitig das Bestreben des WVUs ist, den Energiebedarf zu minimieren, wird in der angewandten Methodik davon ausgegangen, dass während der Versorgung der MZ_{SOLL} der Mindestversorgungsdruck von 3,4 bar im höchsten Punkt des Netzes nicht überschritten wird. Das derzeit für die MZ_{SOLL} geplante Mess- und Regelsystem ist dazu jedoch nicht in der Lage. Die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse zum elektrischen Energiebedarf der MZ_{SOLL} sind demnach als ein Potenzial zu begreifen, welches durch eine zusätzliche Erweiterung des Mess- und Regelsystems ausgeschöpft werden kann. Wenn der Netzdruck durch eine solche Erweiterung so niedrig gehalten werden kann, wie für eine sichere Versorgung nötig ist, wird je nach verwendeter Pumpensteuerung ein elektrischer Energiebedarf zwischen 235.000 kWh/a und 296.000 kWh/a erwartet. Das ist eine Verringerung von 38 bis 51 % gegenüber dem ALT-Zustand.

Es wird dem WVU empfohlen, die ersten Ergebnisse des tatsächlichen Energiebedarfs der MZ_{SOLL} in einer ein- bis zweijährigen Betriebszeit im SOLL-Zustand abzuwarten, um über eine Investitionsrechnung die Wirtschaftlichkeit zusätzlicher Optimierungsmaßnahmen wie die Erweiterung des Mess- und Regelsystems zu bewerten.

Neben der Erweiterung des Mess- und Regelsystems könnte eine weitere zusätzliche Optimierungsmaßnahme die Ermittlung einer differenzierten Pumpensteuerung sein, mit welcher der Energiebedarf minimal gehalten werden kann. Dies ist ein weiteres Ziel der Arbeit, das mit der hier angewandten Methodik aus mehreren Gründen nicht erreicht werden kann. Ein Grund dafür liegt darin, dass die Klassifizierung der über ein Jahr auftretenden Lastfälle in fünf Klassen eine differenzierte Betrachtung der an den DEAs anfallenden Förderströme und die davon abhängige Entwicklung des Wirkungsgrades verhindert. Ein weiterer Grund ist die von der Kalibrierung des Rechnernetzmodells vorgegebene Genauigkeit der hydraulischen Simulationen. Diese verhindert die Ermittlung wesentlicher Unterschiede zwischen dem Energiebedarf der unterschiedlichen Pumpensteuerungen. Des Weiteren können potenziell vorhandene Vordruckunterschiede vor den DEAs nicht in das Rechnernetzmodell mit aufgenommen werden, sodass das Potenzial einer gegebenenfalls energetisch „günstiger“ angebundenen DEA nicht erkannt und somit in einer Pumpensteuerung nicht berücksichtigt werden kann.

Um den aufgetretenen Problemen zur Ermittlung einer energieeffizienten Pumpensteuerung zu begegnen, wird die bei Hähnlein (2008) beschriebene Methodik zur Betriebsoptimierung von Reinwasserpumpen in einem Verteilnetz aufgegriffen und mit der hier angewandten Methodik verglichen. Der Vergleich beider Methodiken zeigt, dass Hähnlein durch die Anwendung eines Algorithmus in MATLAB deutlich mehr Lastfälle beschreiben kann, als dies in der vorliegenden Arbeit der Fall ist. Dadurch ist eine differenziertere Berücksichtigung des Wirkungsgradverlaufs der Pumpen und somit die Entwicklung einer optimalen Pumpensteuerung möglich. Aus dem Vergleich beider Methodiken wird ein Ansatz zur Anwendung des von Hähnlein entwickelten Optimierungsmodells auf die in dieser Arbeit betrachtete MZ_{SOLL} entwickelt. Durch dessen Umsetzung können auch die Kalibrierung des Rechnernetzmodells und potenziell vorhandene Vordruckunterschiede mit berücksichtigt werden.

Im nächsten Schritt der Arbeit wird mit Hilfe einer Investitionsrechnung die Wirtschaftlichkeit der Sanierung sowie Integration der DEA MATH in das Versorgungssystem berechnet. Die Wirtschaftlichkeit dieser potenziellen Investition kann nicht nachgewiesen werden. Das WVU würde durch die Investition über 40 Jahre hinweg eine jährliche Vermögensminderung von - 3.401 €/a bis - 7.452 €/a erfahren. Neben der Wirtschaftlichkeit gilt es allerdings die Versorgungssicherheit zu beachten. Deshalb sollte das Versorgungskonzept der MZ_{SOLL} auf die Notwendigkeit der Integration der DEA MATH zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit hin untersucht werden und die Investitionsentscheidung anschließend unter diesem Gesichtspunkt getroffen werden.

Abschließend wird das Versorgungsgebiet auf weiteres energetisches Potenzial hin untersucht. Dabei wird festgestellt, dass kein energetisches Optimierungspotenzial vorliegt, welches durch den vorzeitigen Austausch von Rohrleitungen zur Reduzierung strömungsbedingter Druckverluste unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit ausgeschöpft werden könnte. Dennoch sollte das WVU die Möglichkeit prüfen, die Energiekosten durch die Begrenzung von Wasserverlusten und die Ausnutzung von Schwachlastpreisen zu senken. Weiterhin wird dem WVU vorgeschlagen, auch die für den internen Gebrauch bestimmten Druckmesser und Wasserzähler regelmäßig auf ihre korrekte Funktionsweise zu überprüfen, sodass zukünftigen Problemen und Fragestellungen auf Grundlage solider Messwerte begegnet werden kann.

Literaturverzeichnis

Becker, H. P. (2012): Investition und Finanzierung. Grundlagen der betrieblichen Finanzwirtschaft. 5. Wiesbaden: Gabler Verlag.

Brunner, C. U. (2009): Efficiency Classes Electric Motors and Systems. Sydney.

Dabkowski, T. (2015): Aktuelle Schrottpreise. Informationen rund um Schrott und Schrottpreise. Edited by T. Dabkowski. Available online at <http://schrottpreise.eu/schrottpreise-liste/>, zuletzt geprüft am: 16.11.2015.

DVGW GW 303-1 (2006): Berechnung von Gas- und Wasserrohrnetzen - Teil 1. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn.

DVGW W 392 (2003): Rohmetzinspektion und Wasserverluste - Maßnahmen, Verfahren und Bewertung. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn.

DVGW W 400-1 A (2015): Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen, Teil 1: Planung. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn.

DVGW W 400-3 (2006): Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen, Teil 3: Betrieb und Instandhaltung. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn.

DVGW W 410 (2008): Wasserbedarf - Kennwerte und Einflussgrößen. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn.

DVGW W 611 (1996): Energieoptimierung und Kostensenkung in Wasserwerksanlagen. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn.

DVGW W 617 (2006): Druckerhöhungsanlagen in der Trinkwasserversorgung. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn.

DVGW-Information W Nr.77 (2010): Handbuch Energieeffizienz/Energieeinsparung in der Wasserversorgung. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Bonn und Osnabrück.

EDL-G (2015): Gesetz über Energiedienstleistungen und andere Energieeffizienzmaßnahmen, Fassung vom: 15.04.2015. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Available online at <http://www.gesetze-im-internet.de/edl-g>, zuletzt geprüft am: 03.09.2015.

Endress + Hauser : Technische Information. Cerabar T PMC131, PMP131, PMP135. Weil am Rhein.

ENTEGA (2014): Jahreswasserbericht 2013. (interner Gebrauch).

ENTEGA (2015): Interne Unternehmensinformation an Dominik Marx, (2015).

Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH (2007): Wasserwirtschaft kann Stromkosten für Pumpen um 16 Prozent senken. In: *Wasser und Abwasser* 10 (35).

- Fischer&Porter GmbH (1993):** Betriebsanleitung. Magnetisch-induktiver Durchflußmesser mit geschaltetem Gleichfeld. Göttingen (BA 1.2-17/04.93).
- Grüger, M. (2015):** Allgemeine Informationen der ENTEGA. Gespräch an Dominik Marx. Darmstadt, (03.08.2015).
- Hähnlein, C. (2008):** Numerische Modellierung zur Betriebsoptimierung von Wasserverteilnetzen. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Bauingenieurwesen und Geodäsie.
- Hähnlein, C.; Strutz, O. (2010):** Kalibrierung hydraulischer Modellnetze in der Wasserversorgung. In: *gwf-Wasser / Abwasser*, S. 10–13.
- Hessisches Statistisches Landesamt (2015):** Wasserabgabe an Letztverbraucher in Hessen 2013 nach Verwaltungsbezirken. Wiesbaden. Available online at <http://www.statistik-hessen.de/themenauswahl/umwelt-verkehr/regionaldaten/wasserabgabe-an-letzterverbraucher-in-hessen/index.html>, zuletzt geprüft am: 03.12.2015.
- Imber, H. (2015):** Genauigkeit der Wasserzähler Darmstädter Hochzonen. Persönliches Gespräch an Martin Grüger Dominik Marx. ENTEGA Darmstadt, (25.06.2015).
- Ingenieurbüro Fischer-Uhrig (2015):** STANET Netzberechnung. Available online at <http://www.stafu.de/produkt/21-hydraulik>, zuletzt geprüft am: 18.09.2015.
- ISO 50001 (2011):** Energiemanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung. Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin.
- Kersting, M.; Werbeck, N.: Trinkwasser und Abwasser in Zeiten des Wandels.** Ruhr-Forschungsinstitut für Innovations- und Strukturpolitik e.V. (dynaklim-Publikation Nr. 39).
- Kilchmann, A. et al. (2004):** Energie in der Wasserversorgung. Ratgeber zur Energiekosten- und Betriebsoptimierung. Bundesamt für Energie BFE; Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches. Zürich.
- Mutschmann, J. und Stimmelmayer, F. (2007):** Taschenbuch der Wasserversorgung. 14. Stuttgart/Wiesbaden: Vieweg Verlag.
- Neumaier, R. (1994):** Hermetische Pumpen - Die ökologische Lösung bei Kreislaspumpen und rotierenden Verdrängermaschinen: Verlag und Bildarchiv 1994.
- Palotas, L. (Ed.) (2003):** Elektronik für Ingenieur. 1.Auflage. Wiesbaden: Vieweg Verlag.
- Plath, M.; Wichmann, K. (2009 b):** Energieverbrauch der deutschen Wasserversorgung. In: *energie / wasser-praxis* (4), S. 54–55.
- van den Busch, U. (2010):** Bevölkerungsschätzung für die hessischen Landkreise und kreisfreien Städte. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. Wiesbaden (Report Nr. 792).
- VEGA Grieshaber KG (2012):** Ihre Anfrage: Druckerhöhungsanlage; Angebot Nr. 6263379/1.0. Brief an Martin Grüger HSE AG. Schiltach, (18.07.2012).

Wissenschaftsstadt Darmstadt (2014): Datenreport 2014. Available online at <https://www.darmstadt.de/standort/statistik-und-stadtforschung/datenreport-2014/preise-volkswirtschaft-und-umwelt/index.htm>, zuletzt geprüft am: 03.12.2015.

Wolle, C. (2015): Hintergrundinformationen über STANET bei ENTEGA. Gespräch an Dominik Marx. Darmstadt, (15.07.2015).

Xylem Water Solutions Deutschland GmbH (2015a): Datei "Auswertung Leistungsmessung Darmstatt Oettinger Villa 20141209.xlsx" an Martin Grüger HSE AG, (21.05.2015).

Xylem Water Solutions Deutschland GmbH (2015b): Datei "Kennlinien HSE 280515.pdf" an Martin Grüger HSE AG, (28.05.2015).

Xylem Water Solutions Deutschland GmbH (2015c): Datei "Pumpenreglement HSE 280515.xlsx" an Martin Grüger HSE AG, (28.05.2015).

Xylem Water Solutions Deutschland GmbH (2015d): Datei "Kennlinien-schar bei 50Hz verschiedene Laufräderzahl.pdf" an Martin Grüger HSE AG, (27.07.2015).

Anhang

1.	Zählerart, Datenabfragesysteme und die Zuständigkeit der Zählerbetreuung der DEAs und DMAs.....	XVI
2.	Analyse der Datenausgabe der Abfragesysteme Sensus und Acron	XVII
3.	Genauigkeit der IDM-Zähler.....	XVIII
4.	Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN	XX
5.	Kennlinien und Wirkungsgrade der potentiellen Pumpenkonfigurationen der DEA MATH.....	XXVIII
6.	Auswertung der Leistungsmessung.....	XXX
7.	Wirkungsgrade	XXXI
8.	Analyse der Vordrucksituation der DEA HEIN, MATH, OETI.....	XXXIII
9.	Analyse der Vordrucksituation in Bezug auf die niederzonenseitigen Druckverluste	XXXIX
10.	Druckunterschiede durch falsche geodätische Höhen oder falsch eingestellte Offsetspannung	XL
11.	Sonstige Anpassungen am Rechnernetzmodell und den Simulationsvorgaben	XLI
12.	Tabellen zur Ermittlung des Energiebedarfs des ALT-Zustandes	XLIII
13.	Tabellen zur Ermittlung des Energiebedarfs des SOLL-Zustandes	XLIV
14.	Netzgrafiken.....	XLIX

1. Zählerart, Datenabfragesysteme und die Zuständigkeit der Zählerbetreuung der DEAs und DMAs

Tabelle 16: Zählerart, Datenabfragesystem und die Zuständigkeit der Zählerbetreuung der DEA (nach: ENTEGA 2015)

Anlage	Datenabfrage	Zählerbetreuung	Zählerart
DEA MATH	QVL	ENTEKA	Verbund
DEA MARI	QVL	ENTEKA	IDM
DEA HEIN HZ1	QVL	ENTEKA	IDM
DEA HEIN MZ	LZH	Hessenwasser	2x IDM
DEA OBEF HZ3	LZH	Hessenwasser	-

Tabelle 17: Zählerart, Datenabfragesystem und die Zuständigkeit der Zählerbetreuung der DMA (nach: ENTEKA 2015)

Anlage	Datenabfrage	Zählerbetreuung	Zählerart
DMA HEIN HZ3a +2a	LZH	Hessenwasser	IDM
DMA HEIN HZ2a	Sensus	ENTEKA	Mono
DMA HEIN HZ3a	-	-	-
DMA KLAP	Sensus	ENTEKA	Verbund
DMA JAHN	Sensus	ENTEKA	Verbund
DMA BRES	-	-	-
ÜSV HEIH	QVL	ENTEKA	Verbund

2. Analyse der Datenausgabe der Abfragesysteme Sensus und Acron

Im Folgenden wird das Ergebnis der Analyse der unterschiedlichen Datenabfragesysteme vorgestellt, um festzustellen, ob die ausgegebenen Datenreihen zeitlich zueinander verschoben sind.

Die Archivdatenbank Acron (Der Anlagenchronist) der Leitstelle Hessenwasser LZH summiert die Messdaten einer Stunde und speichert die Summe unter der Uhrzeit der abgelaufenen Stunde ab (Imber 2015). Beispiel:

90 m³ um 02:00 Uhr → Summe der Fördermengen zwischen 01:00 und 02:00

Die Durchsicht der Datenreihen ergibt, dass bei der Umstellung von Winter- auf Sommerzeit am 31.03.2013 kein Wert für 02:00 Uhr hinterlegt wird. Für die Umstellung von Sommer- auf Winterzeit am 27.10.2013 wird die Uhrzeit 02:00 Uhr doppelt eingetragen – einmal mit gemessener Fördermenge und einmal ohne. Diese Vorgehensweise wird in den Datenreihen der Abfragesysteme Sensus, Acron der LZH und QVL vorgefunden, sodass bezüglich der Zeitumstellung keine Verschiebungen der Datenreihen zueinander auftreten sollten.

3. Genauigkeit der IDM-Zähler

In Abbildung 24 wird der Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Messwertabweichung der IDM-Zähler dargestellt. Die DEAs HEIN HZ1+MZ sowie MARI, in denen IDM-Zähler verbaut sind, sind nicht drehzahlregelt und liefern deshalb immer den maximalen Förderstrom. Unter der Voraussetzung, dass die Zähler geeicht sind, belaufen sich die Messwertabweichungen für diese DEAs somit auf $\pm 0,5\%$.

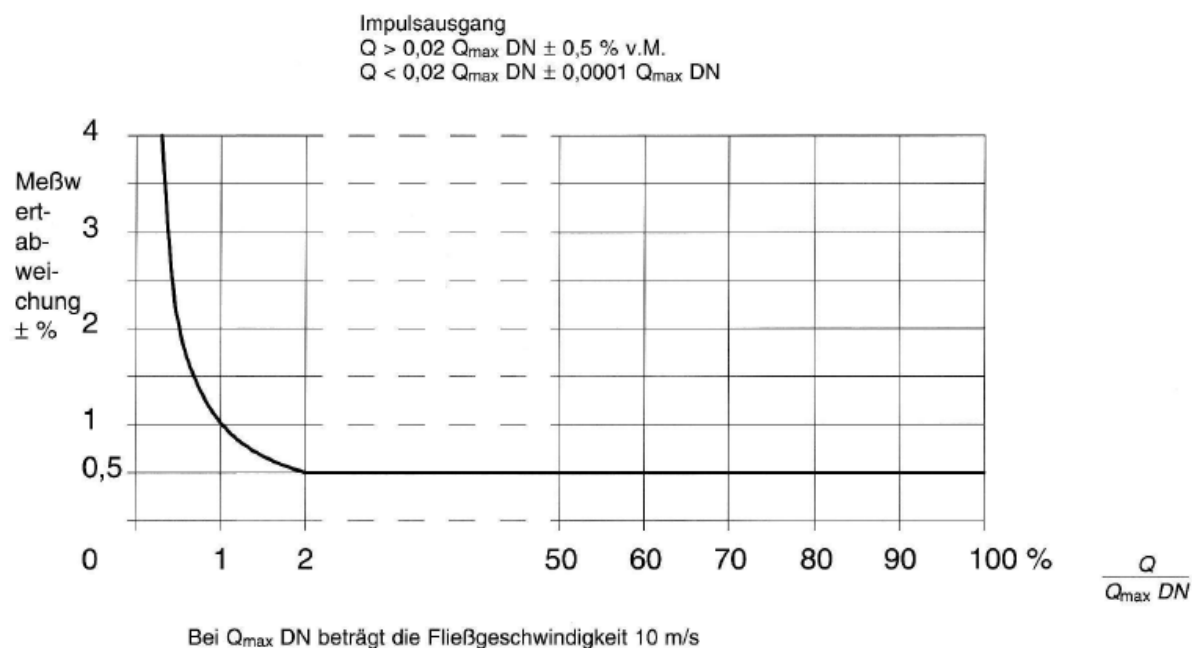


Abbildung 24: Messwertabweichung der magnetisch-induktiven Durchflussmessung (Fischer&Porter GmbH 1993)

Eine möglichst genaue Messung innerhalb der akzeptablen Fehlertoleranzen stellt neben der Eichung Anforderungen an die Einbaubedingungen der Wasserzähler. Nach der Betriebsanleitung der verwendeten Zähler dürfen beispielsweise keine „stehenden Wirbel in die Zone der Messwertbildung hineinreichen“ (Fischer&Porter GmbH 1993). Vor und nach dem Zähler muss eine gewisse Vergleichmäßigung des Strömungsprofils erfolgen. „Die Erfahrungen haben gezeigt, dass in den meisten Fällen eine gerade Einlaufstrecke von $3 \cdot DN$ und eine Gerade Auslaufstrecke von $2 \cdot DN$ ausreichend ist“ (Fischer&Porter GmbH 1993).

Abbildung 25 zeigt im Vordergrund den IDM-Zähler der DEA HEIN HZ1. Das gekrümmte Rohr ist direkt an den IDM angeflanscht. Im Hintergrund sind der IDM-Zähler der DMA HEIN HZ3a+2a sowie der Mono-Zähler der DMA HEIN HZ2a zu sehen. Im Vorlauf des IDM-Zählers befindet sich eine Verjüngung auf DN 150. Zwischen Verjüngung und Zähler befindet sich ein 20 cm langes Rohrstück (siehe Abbildung 26). Laut der oben gegebenen Empfehlung sollte das Rohrstück, das Zähler und Verjüngung voneinander trennt, mindestens 45 cm lang sein. Weiterhin ist unmittelbar nach dem IDM-Zähler ein T-Stück angeflanscht, das den Volumenstrom auf die DMA HEIN HZ3a sowie HEIN HZ2a

aufteilt. Dieses sollte durch ein 30 cm langes Rohrstück vom Zähler getrennt sein. Unmittelbar vor dem Mono-Zähler der DMA HEIN HZ2a ist ein gekrümmtes Rohr in DN 100 angeflanscht (siehe Abbildung 27). Zwischen Krümmer und Zähler sollte ein 30 cm langes Rohrstück verlegt sein.

Demnach sind die erforderlichen Einbaubedingungen für eine möglichst genaue Messung bei den hier aufgeführten Wasserzählern nicht gegeben.



Abbildung 25: Im Vordergrund, IDM-Zähler der DEA HEIN HZ1; im Hintergrund, IDM-Zähler der DMA HEIN HZ2a+3a und Monozähler der DMA HEIN HZ2a



Abbildung 27: Monozähler der DMA HEIN HZ2a; DN 100



Abbildung 26: IDM-Zähler der DMA HEIN HZ2a+3a, DN 150

4. Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN

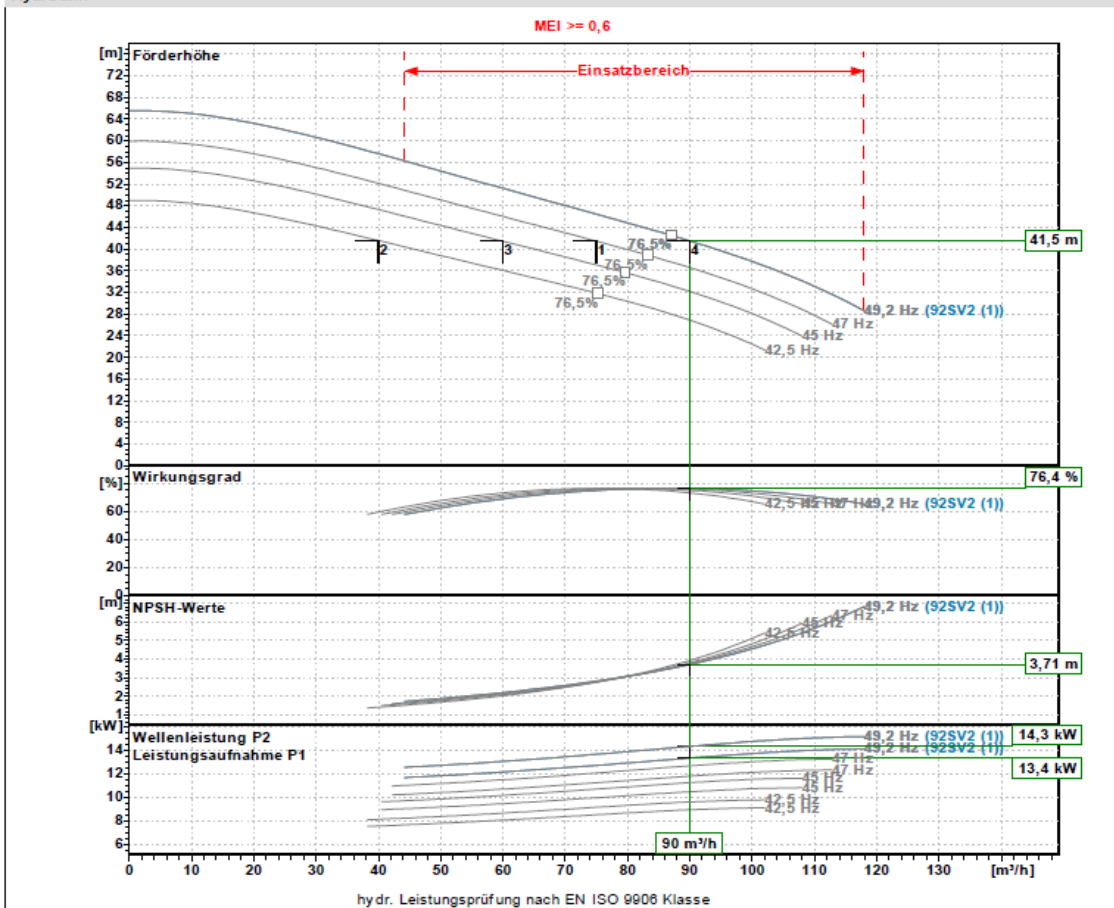
Technische Daten
92SV2G150T

Item Nr. 1 Pumpe
Revisionsnummer

Firmenname	Empfänger HSE AG
Sachbearbeiter	Martin Grüger
Telefonnummer	06151 / 7018020
Fax-Nummer	
E-Mail Adresse	martin.grueger@hse.ag

Absender
Xylem Water Solutions Deutschland GmbH
Wolfgang Hennig
03643 / 77 83 97
03642 / 77 83 98
wolfgang.hennig@xyleminc.com

Hydraulik



Betriebsdaten			Werkstoffe	
Förderstrom	90	m³/h	Pumpengehäuse	Grauguß
Förderhöhe	42	m	unterer Lagerträger	Grauguß
Fördergut	Wasser, rein		Laufrad	Edelstahl / AISI 316L
Fluidtemperatur	4	°C	Diffusor	Edelstahl / AISI 304
Dichte	1	kg/dm³	Gehäusemantel	Edelstahl / AISI 304
Kin. Viskosität	1,57	mm²/s	Welle	Edelstahl / AISI 431
Dampfdruck	0,023	bar	Adapter	Grauguß
Pumpendaten			Spaltring	Technopolymer PPS
Fabrikat	Vogel Pumpen		Kupplung	Grauguß
Typ	92SV2G150T		Pumpenkopf	Grauguß
Anlagenart	Einzelpumpe		Dichtungsgehäuse	Grauguß
Betriebsart	2 pol		Elastomere	EPDM
Gewicht	182	kg	Kupplungsschutz	Edelstahl / AISI 304
Hydraulische Daten (Betriebspunkt)			Motordaten	
Förderstrom	90,00	m³/h	Nennleistung	15 kW
Förderhöhe	41,50	m	Nennndrehzahl	2950 1/min
Wellenleistung	13,35	kW	Nennspannung	3~ 400 V (380-415 V)
			Motorausführung 3 Phasen IE3 Drehstrom Motor (premium efficiency)	
Artikelnummer der Standardausführung 101686041			Name / Baugröße PLM160.../3150 E3 / 160	
Projekt		Projektnummer	Erstellt durch	Letzte Änderung
DEA Oetti,; Heinrich MZ; Matthildenhö		50526	Hennig, Wolfgang	26.05.2015 28.05.2015

Version: 15A04 / 1.37 - 31.03.2016 (Build 1833)

IAD

Seite: 9 / 47

Abbildung 28: Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN (1 Pumpe) (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015b)

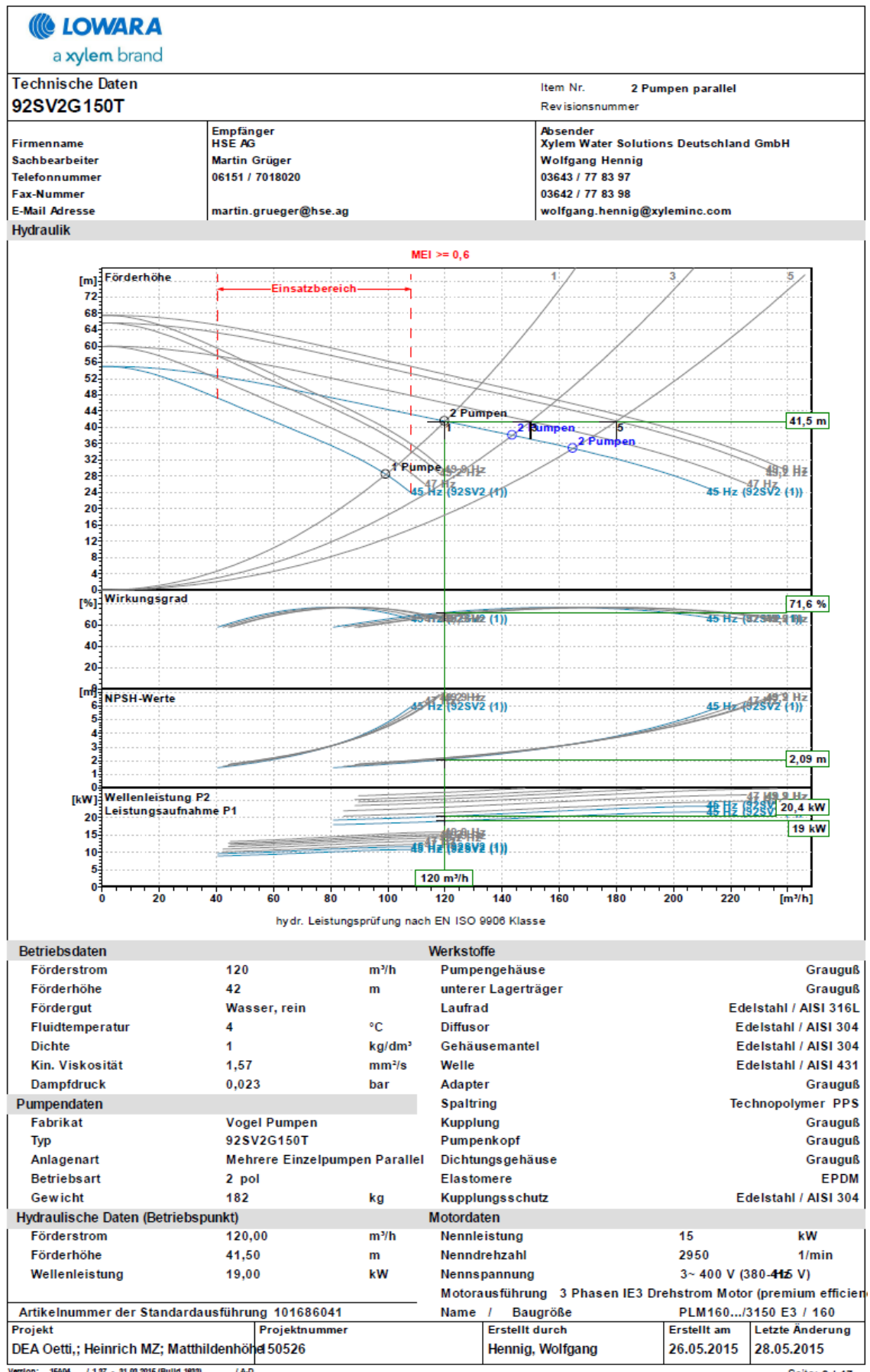


Abbildung 29: Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN (2 Pumpen) (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015b)

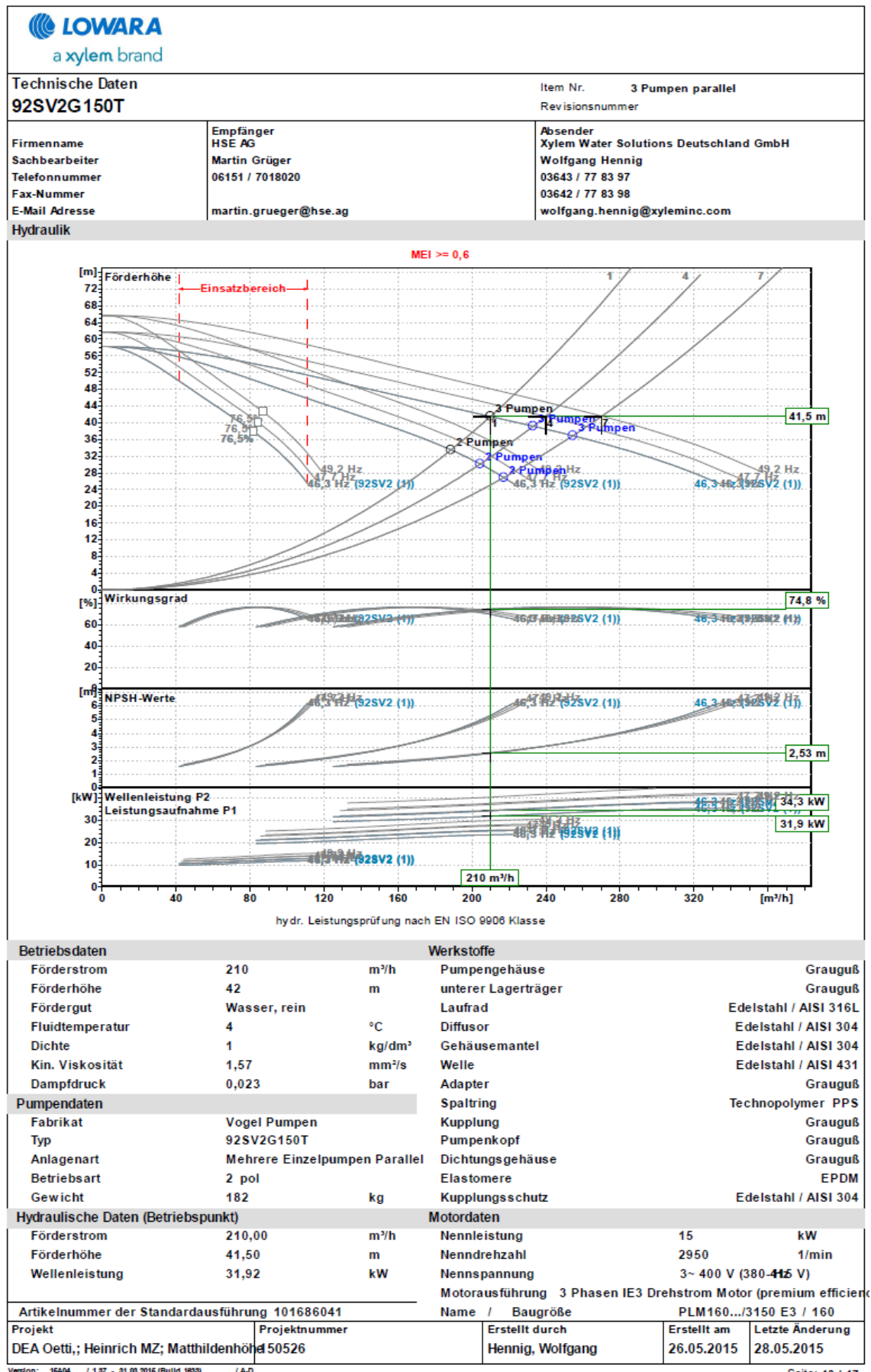


Abbildung 30: Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN (3 Pumpen) (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015b)

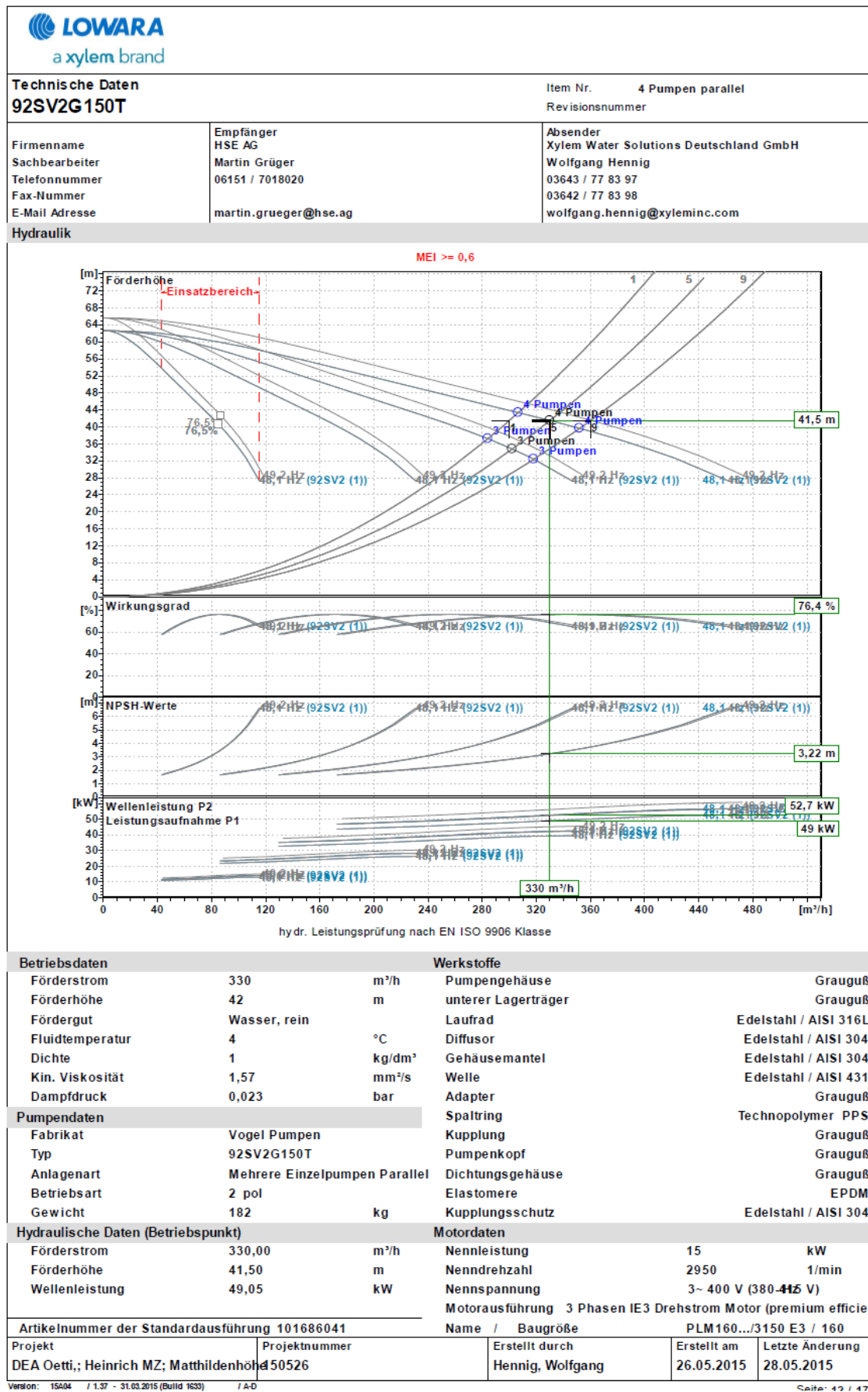


Abbildung 31: Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN (4 Pumpen) (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015b)

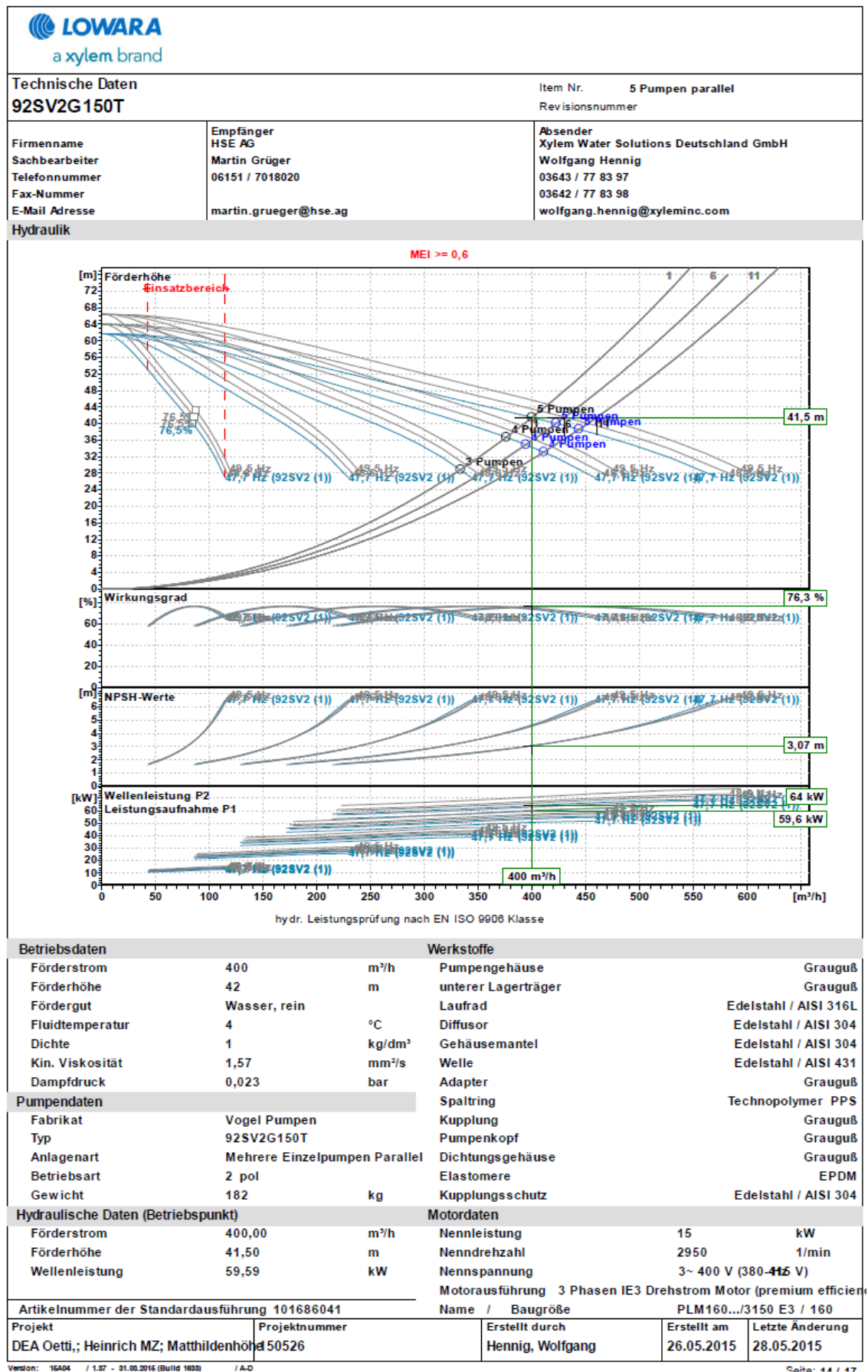


Abbildung 32: Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN (5 Pumpen) (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015b)

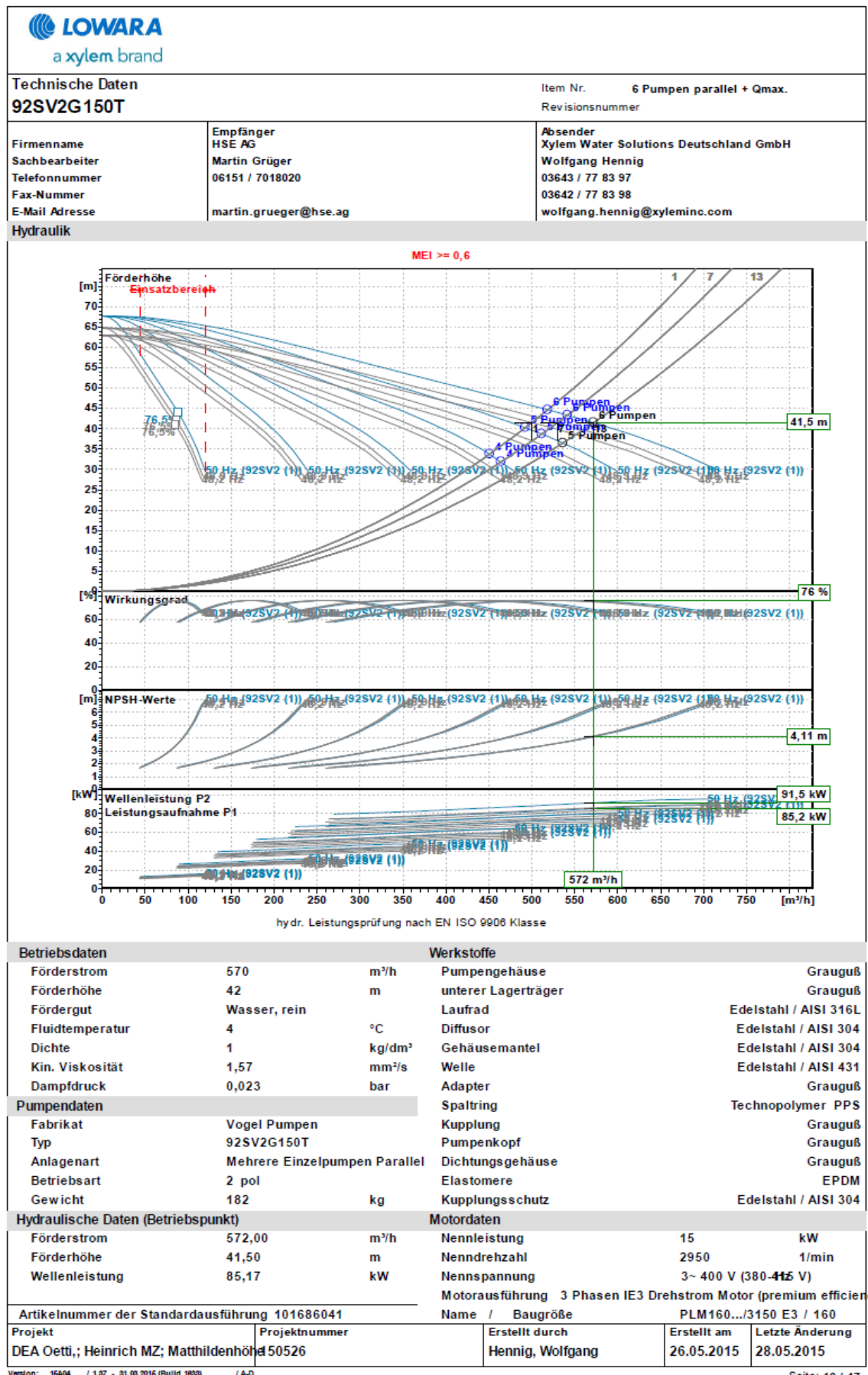


Abbildung 33: Hydraulische Leistungsprüfung der Pumpen für DEA OETI + HEIN (6 Pumpen) (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015b)

Tabelle 18: Gesonderte Ergebnisse der hydraulischen Leistungsprüfung (Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015c)

technische Daten Pumpen (DEA OETi --> Typ GT 62 HV 5 x 92SV2 G 150 T)							
BP	Anz. Pumpen	Q (m³/h)	H (m)	Frequenz (Hz)	Eta (%)	P2 [kW]	P1 [kW]
η-Pu (1 Pumpe)							
2	1	30	41,5	42,5	59,6%	7,50	8,2
3	1	60	41,5	45,0	71,6%	9,50	10,2
1	1	75	41,5	47,0	75,7%	11,3	12,1
4	1	90	41,5	49,2	76,4%	13,4	14,3
η-Pu (2 Pumpen)							
1	2	120	41,5	45,0	71,6%	19,0	20,4
3	2	150	41,5	47,0	75,7%	22,5	24,2
5	2	180	41,5	49,2	76,4%	26,7	28,7
η-Pu (3 Pumpen)							
1	3	210	41,5	46,3	74,8%	31,9	34,3
	3	225	41,5	47,0	75,7%	33,8	36,3
4	3	240	41,5	47,7	76,3%	35,8	38,4
7	3	270	41,5	49,2	76,4%	40,1	43,0
η-Pu (4 Pumpen)							
1	4	300	41,5	47,0	75,7%	45,0	48,4
5	4	330	41,5	48,1	76,4%	49,0	52,7
9	4	360	41,5	49,2	76,4%	53,4	57,4
η-Pu (5 Pumpen)							
1	5	400	41,5	47,7	76,3%	59,6	64,0
6	5	430	41,5	48,6	76,5%	63,8	68,5
11	5	460	41,5	49,5	76,3%	68,3	73,4
η-Pu (6 Pumpen)							
1	6	500	41,5	48,2	76,5%	74,3	79,8
7	6	530	41,5	48,9	76,5%	78,6	84,4
13	6	572	41,5	50,0	76,3%	85,2	91,5
		Q max.					

5. Kennlinien und Wirkungsgrade der potentiellen Pumpenkonfigurationen der DEA MATH

Die nach energetischen Gesichtspunkten optimierten hydraulischen Simulationen in STANET haben ergeben, dass die zu erwartende Förderhöhe der DEA MATH im Bereich von 30 - 36 m liegen wird (vgl. Tabelle 31 und Tabelle 32, Anhang S. XLVI ff). In Abbildung 34 auf der nächsten Seite werden die Pumpenkennlinien und Wirkungsgrade der verfügbaren Pumpenausführungen zur Ausrüstung der DEA MATH dargestellt. Für einen möglichst optimalen Wirkungsgrad bei einem Förderstrom von 90 m³/h eignet sich die Pumpenkonfiguration 02/2 am besten. Es wird von einer durchschnittlichen Förderhöhe von 33 m ausgegangen. Die sich für diese Konfiguration ergebende Kennlinie wird für alle weiteren Berechnungen verwendet. Bei einem Förderstrom von 90 m³/h ergibt sich ein Pumpenwirkungsgrad η_{Pu} von 79 %.

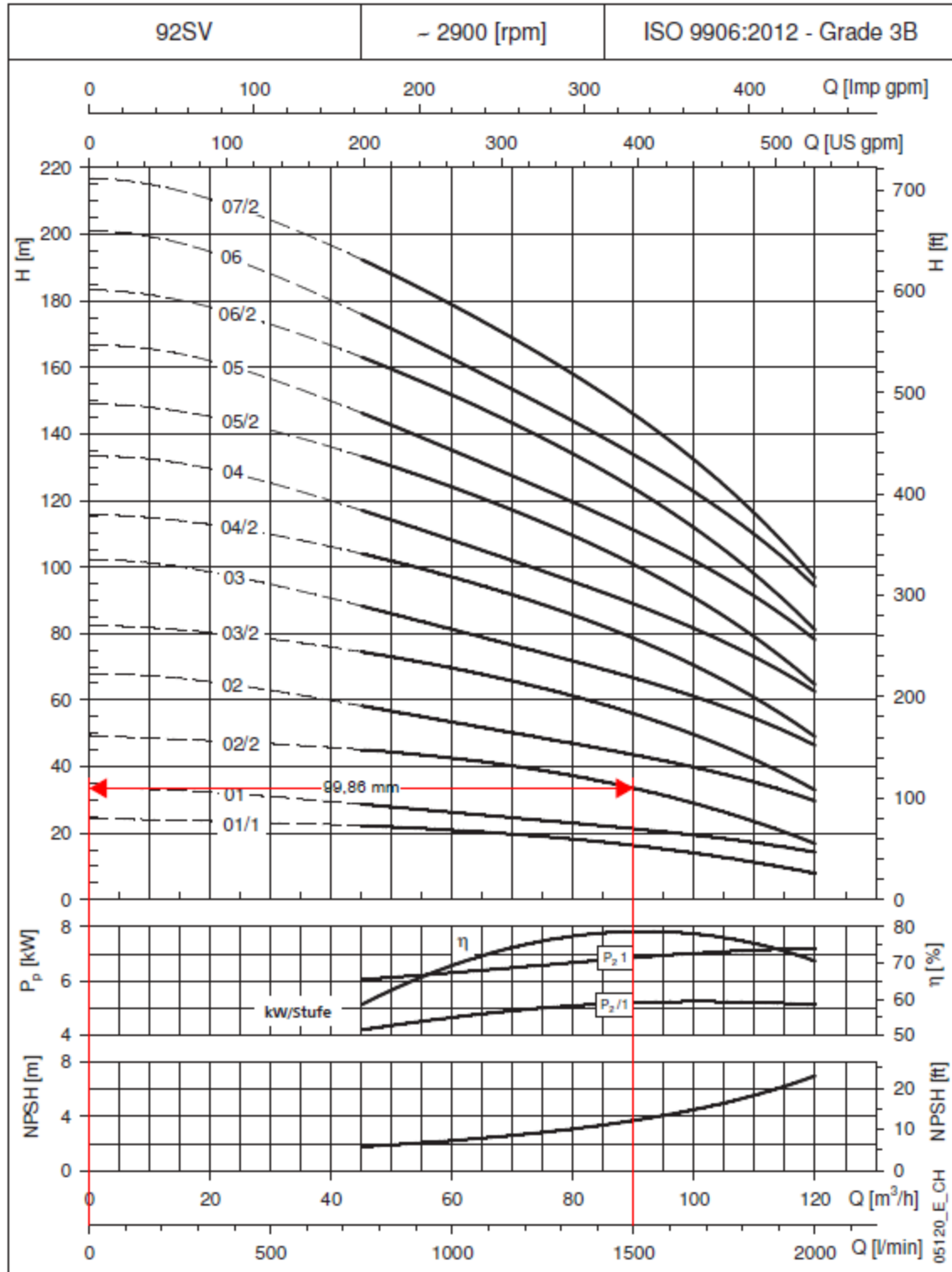
BAUREIHE 92 SV
KENNLINIEN BEI 2900 min⁻¹, 50 Hz, 2-POLIG


Abbildung 34: Pumpenkennlinien und Wirkungsgrade der verfügbaren Pumpenausführungen zur Ausrüstung der DEA MATH (nach Xylem Water Solutions Deutschland GmbH 2015d)

7. Wirkungsgrade

Gegenüberstellung der errechneten Pumpen- und gemessenen Gesamtwirkungsgrade

Abbildung 35 zeigt die grafische Gegenüberstellung von η_{Pu} und $\eta_{G,mess}$. Die für die Kurven verwendeten Pumpenwirkungsgrade η_{Pu} stammen aus den vom Pumpenhersteller durchgeführten Leistungsprüfungen. Diese werden im Anhang ab S. XX aufgeführt. Die gemessenen Gesamtwirkungsgrade $\eta_{G,mess}$ stammen aus der am 09.12.2014 durchgeführten Leistungsmessung. Diese sind in Tabelle 19 aufgeführt. Die farbliche Differenzierung soll jeweils die in Betrieb genommene Anzahl an Pumpen untereinander abgrenzen. Zwei Trendlinien zeigen die allgemeine Wirkungsgradentwicklung der beiden Wirkungsgradarten in Abhängigkeit der Fördermenge an. Die Trendlinien basieren auf den Betriebspunkten, bei deren Fördermengen die Werte des η_{Pu} mit rund 76,5 % optimal sind. Konsequenterweise verläuft die Trendlinie $\eta_{Pu(opt)}$ waagrecht. Die Trendlinie $\eta_{Mess(opt)}$ ergibt sich aus den Werten der η_{Mess} , die zu den jeweiligen Fördermengen ermittelt wurden. Aus der Trendlinie wird ersichtlich, dass $\eta_{Mess(opt)}$ mit steigender Fördermenge abnimmt.

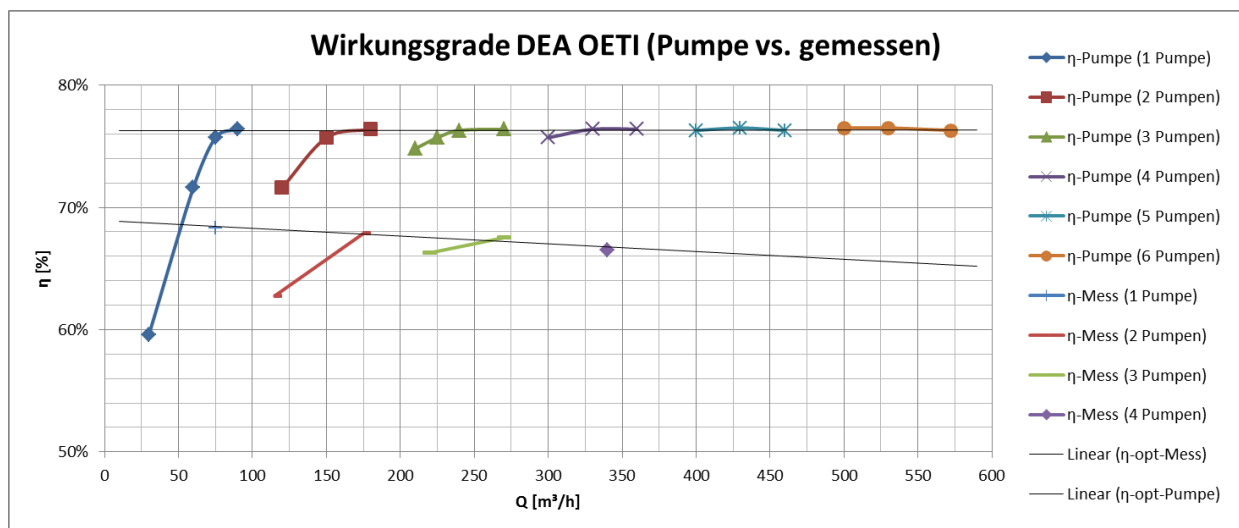


Abbildung 35: Gegenüberstellung der errechneten Pumpen- und gemessenen Gesamtwirkungsgrade

Ermittelte Gesamtwirkungsgrade der DEAs HEIN und OETI

In Tabelle 20 werden die über die Funktion $f(Q)$ ermittelten Gesamtwirkungsgrade der DEAs HEIN und OETI dargestellt. Diese werden bei der Berechnung des Energiebedarfs und der Auswahl der Pumpensteuerung der MZ_{SOLL} benötigt.

Tabelle 20: Ermittelte Gesamtwirkungsgrade und Wirkungsgradverhältnisse der DEAs HEIN und OETI

Pumpen	Förderstrom [m³/h]	η-Pu [%]	η-G/η-Pu [%]	η-G [%]
1	37,5	59,6	90,5	54,0
1	75	75,7	90,2	68,3
1	87,5	76,4	90,0	68,8
1	90	76,4	90,0	68,8
1	95	76,4	90,0	68,7
2	137,5	71,6	89,6	64,1
2	175	76,4	89,2	68,2
2	180	76,4	89,2	68,1
2	185	76,4	89,1	68,1
2	187,5	76,4	89,1	68,1
2	195	76,4	89,0	68,0
2	205	74,8	88,9	66,5
3	237,5	76,3	88,6	67,6
3	275	76,4	88,2	67,4
3	285	76,4	88,1	67,3
3	295	75,7	88,0	66,7
4	375	76,4	87,3	66,7
5	475	76,3	86,3	65,9

8. Analyse der Vordrucksituation der DEA HEIN, MATH, OETI

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Vordruckanalyse der DEAs HEIN, MATH sowie OETI vorgestellt. Die dazu ausgewählten Messreihen werden in Tabelle 21 dargestellt. Der Vergleich der Vordrucke wird über die vor den DEAs anliegenden Druckhöhen vorgenommen. Diese werden im Folgenden als Vordruckhöhen bezeichnet. Da die Vordruckhöhen von vielen unterschiedlichen Faktoren beeinflusst werden, werden bei der Vordruckanalyse je nach Fragestellung bestimmte Messwerte in Abhängigkeit der Einflussfaktoren ausgewählt und miteinander verglichen. Für jede Fragestellung erfolgt zunächst eine Erläuterung der Vorgehensweise und der Auswahl der Messwerte aus Tabelle 21, bevor aus der Analyse der ausgewählten Messwerte das Ergebnis ermittelt und versucht wird, die Fragestellung damit zu beantworten.

Einleitend erfolgt die Vorstellung der Inhalte der Tabelle 21. Es wird dargelegt, wie der Aufbau der Tabelle zu verstehen ist. Es gibt unterschiedliche Faktoren, die den Vordruck der DEAs beeinflussen. Dazu zählen Förderstrom, Tageszeit oder Behälterwasserstand des HB OBER. Aufgrund der Komplexität werden Fallgruppierungen nach Förderstrom und Tageszeit vorgenommen, sowie zur Verbesserung der Übersicht einzelne Elemente farbig markiert.

Im Anschluss daran erfolgt die Bereinigung der Vordruckhöhen um den Behälterwasserstand des HB OBER. Die Betrachtung der Messreihen zeigt, dass die Vordruckhöhen vom Behälterwasserstand des HB OBER abhängen. Um diesen Faktor bei der Analyse der Messreihen zu eliminieren, werden die Vordruckhöhen um den Behälterwasserstand bereinigt.

Darauf erfolgen die Überprüfung der vom Hersteller angegebenen Fehlertoleranzen und eine Einschätzung des Kalibrierungszustands der Druckmesser. Dazu werden die Vordruckhöhen von DEAs miteinander verglichen, die im gleichen Zeitraum in der verbrauchsarmen Nachtzeit gemessen wurden.

Danach wird untersucht, ob die Vorgänge des Befüllens und Entleerens des HB OBER einen Einfluss auf eine unterschiedliche Ausbildung der Vordruckhöhen haben. Dazu werden Vordruckhöhen von DEAs miteinander verglichen, die zur gleichen Tageszeit bei gleichem Förderstrom der DEA erhoben wurden und sich nur im Verhalten des HB OBER voneinander unterscheiden.

Danach wird die Annahme überprüft, dass durch den Betrieb einer DEA der dort anliegende Vordruck örtlich begrenzt abgesenkt wird. Dazu wird über zwei Messreihen die Entwicklung der Vordruckhöhe einer sich über beide Messreihen außer Betrieb befindlichen DEA mit der Entwicklung der Vordruckhöhe einer DEA verglichen, die einmal in Betrieb und einmal außer Betrieb war.

Als Abschluss wird untersucht, ob die von der Tageszeit abhängige Verbrauchssituation der NZ einen Einfluss auf die Ausbildung unterschiedlicher Vordrucke vor den DEAs hat. Dazu werden Messreihen miteinander verglichen, die die Druckverhältnisse zu unterschiedlichen Tageszeiten wiedergeben.

Vorstellung der Inhalte der Tabelle 21

In Tabelle 21 sind die Ergebnisse aus ausgewählten Stundenwerten zur Analyse der Vordrucksituation dargestellt. Die in fünf Fälle eingeteilten Messreihen unterscheiden sich untereinander in den Förderströmen der einzelnen DEAs. In Fall Nr. 1 werden Messreihen aufgeführt, in denen keine der DEAs in Betrieb war. In den restlichen vier Fällen werden die Messreihen nach den Förderzuständen der DEAs gruppiert. Die Förderströme, die ungleich null sind, werden in Gelb hervorgehoben. Dies soll die Zuordnung der variierten Förderströme zu den beschriebenen Fällen verdeutlichen. Innerhalb der Fälle Nr.1 und 2 werden weiterhin die betrachteten Tageszeiten variiert. Es werden Messreihen miteinander verglichen, die entweder während der Nacht und während des Tages erhoben wurden. In roter Schriftfarbe sind jeweils die Vordruckhöhendifferenzen hervorgehoben. Durch die Vordruckhöhendifferenzen werden die Unterschiede innerhalb einer Messreihe zwischen den DEAs MATH sowie OETI auf der einen Seite und der DEA HEIN HZ1 auf der anderen Seite dargestellt. Es werden keine Vordruckhöhendifferenzen zwischen den DEAs MATH und OETI dargestellt, da bei der Analyse der Messwerte auffällt, dass zwischen der Entwicklung der Vordruckhöhen dieser beiden DEAs keine größeren Unterschiede festzustellen sind. Ein Grund dafür könnte die räumliche Nähe der beiden Anlagen im Netz sein.

Bereinigung der Vordruckhöhen um den Behälterwasserstand des HB OBER

Der Vergleich der Vordruckhöhen der DEAs mit dem Behälterwasserstand des HB OBER zeigt, dass ein Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen besteht. Steigt der Behälterwasserstand, steigen auch die Vordruckhöhen der DEAs. Der Zusammenhang wird vor allem bei der Betrachtung der Messreihen des Falls Nr. 1 deutlich, da die Vordruckhöhen dort nicht durch den Betrieb einer DEA lokal beeinflusst werden.

Um den Faktor des Behälterwasserstandes des HB OBER bei der weiteren Analyse zu eliminieren, werden die Vordruckhöhen um den Behälterwasserstand bereinigt. Die bereinigten Vordruckhöhen werden in Tabelle 21 in den Spalten „H (berein.)“ angegeben. Der Behälterwasserstand liegt im Durchschnitt bei 3 m. Zuzüglich der Behälterhöhe von 182 m ergibt sich dort eine durchschnittliche Druckhöhe von 185 m. Um die Messreihen untereinander vergleichen zu können, wird ein Behälterwasserstand von 3 m angenommen und die Vordruckhöhen der DEAs darauf angepasst. Alle weiteren Aussagen in Bezug auf die Vordruckhöhen der DEAs beziehen sich auf die um den Behälterwasserstand bereinigten Vordruckhöhen, die in den Spalten „H (berein.)“ angegeben werden.

Fehlertoleranzen und Kalibrierung der Druckmesser

Die Druckmesser der DEA HEIN HZ1 sowie MZ liegen in unmittelbarer Nähe zueinander und befinden sich auf gleicher geodätischer Höhe. Um die angegebene Fehlertoleranz von 0,5 m bzw. 0,05 bar zu überprüfen, können die Vordruckhöhen der beiden DEAs innerhalb der gleichen Messreihen aus den Fällen Nr.1 und Nr.3 verglichen werden. In beiden Fällen sind die DEAs außer Betrieb, sodass die

Vordruckhöhen nicht durch den Betrieb der den Druckmessern nachgeschalteten Pumpen beeinflusst werden. Der Vergleich zeigt, dass sich die Vordruckhöhen um maximal 0,2 m unterscheiden und innerhalb der Fehlertoleranz von 0,5 m liegen.

Es wird unterstellt, dass der Wasserverbrauch der NZ im Nachtbetrieb keinen Einfluss auf die Vordruckhöhen der DEAs hat. Somit müsste sich bei ausgeschalteten Pumpen durch die Druckhaltung des HB OBER bei allen drei DEAs die gleiche Vordruckhöhe einstellen. Die in Fall Nr. 1 dargestellten Messreihen zeigen, dass dies nicht der Fall ist. Die Vordruckhöhen der DEAs unterscheiden sich in den zur Nachtzeit ermittelten Messreihen um mehrere Meter. Die Differenz der Vordruckhöhen am 20.03. sowie am 08.04. zwischen DEA MATH und DEA HEIN HZ1 reichen von 4,8 bis 5,1 m, zwischen DEA OETI und DEA HEIN HZ1 reichen die Differenzen von 0,8 bis 1,1 m. Diese Differenzen liegen über der Fehlertoleranz von 0,5 m und legen die Vermutung nahe, dass die Kalibrierung der Druckmesser ungenügend ist und den Messwerten deshalb nicht uneingeschränkt vertraut werden kann.

Die weitere Analyse der Ergebnisse findet unter der Annahme statt, dass der an den Druckmessern vorliegende Kalibrierungsfehler jedes Druckmessers konstant bleibt und die zwischen den Messreihen ermittelten Druckschwankungen im Bereich der Fehlertoleranz genau bleiben. Diese Annahme ergibt sich aus der in Unterkapitel 10 im Anhang auf S.XL geführten Diskussion.

Einfluss der Befüllung/Entleerung des HB OBER auf die Ausbildung der Vordruckhöhen

Es wird vermutet, dass die Befüllung/Entleerung des HB OBER einen Einfluss auf die Vordruckhöhen der verschiedenen DEA hat. Diese wird über die Füllstandänderung innerhalb der betrachteten Messreihen ermittelt. Um den Einfluss der Füllstandänderung auf die Differenz zwischen den Vordruckhöhen der DEAs zu ermitteln, werden die Vordruckhöhen von Messreihen miteinander verglichen, in denen die Faktoren „Förderstrom der DEA“ sowie „Tageszeit“ gleich sind. Diese Bedingungen gelten z.B. für die Messreihen vom 20.03. und 08.04. sowie für diejenigen vom 30.09. und 01.12. in Fall 1. Die Vordruckhöhendifferenzen schwanken zwischen den betrachteten Betriebsstunden lediglich zwischen 0 und 0,3 m. Diese Schwankungen liegen im Bereich der Messungenauigkeit der Druckmesser. Die Vermutung, dass die Befüllung/Entleerung des HB OBER die Vordruckhöhen der DEA unterschiedlich beeinflusst, kann somit nicht bestätigt werden.

Einfluss des Förderstroms durch den Betrieb der Pumpen auf die Ausbildung der Vordruckhöhen

Es wird vermutet, dass durch den Betrieb einer DEA der dort anliegende Vordruck örtlich begrenzt abgesenkt wird. Beispielsweise wird dazu Fall Nr.2 mit Fall Nr.1 verglichen. Die Messreihen des Falls Nr.2 werden dadurch charakterisiert, dass lediglich die DEA HEIN HZ1 in Betrieb ist und 400m³/h aus der NZ in die HZ1 fördert. Im Fall Nr. 1 bleibt die DEA HEIN HZ1 genau wie die DEAs OETI und MATH außer Betrieb. Innerhalb der Messreihen des Falls Nr.2 liegen die Vordruckhöhen der DEA HEIN fast durchgängig tiefer als die der DEA MATH und OETI. Nur am 02.06. liegt die Vordruckhöhe der DEA HEIN HZ1 mit 184,5 m um 0,3 m höher als die der DEA MATH. Der Vergleich mit den

Messreihen des Nachtbetriebs in Fall Nr.1 (20.3. und 08.04.) zeigt, dass die Vordruckhöhen der DEA HEIN deutlich über denen der DEAs OETI und MATH liegen, wenn die Pumpen der DEA HEIN nicht betrieben werden. Die Vordruckhöhen der DEA HEIN HZ1 liegen zwischen 4,8 und 5,1 m höher als die der DEA MATH. Für die DEA OETI gilt ein Unterschied von 0,8 bis 1,1 m. Der Betrieb der DEA HEIN HZ1 sorgt also dafür, dass die Vordruckhöhen dort im Vergleich zu den Vordruckhöhen vor den außer Betrieb befindlichen DEAs absinken. Diese Beobachtung kann für alle DEAs beim Vergleich weiterer Messreihen der Tabelle 21 gemacht werden.

Einfluss der Verbrauchssituation der NZ auf die Ausbildung der Vordruckhöhen

Es wird vermutet, dass die Verbrauchssituation der NZ einen Einfluss auf die Ausbildung der Vordruckhöhen nimmt. Die Verbrauchssituation der NZ ist abhängig von der Tageszeit. Folglich werden im Folgenden Messreihen zu unterschiedlichen Tageszeiten verglichen, um zu ermitteln, ob die Vordruckhöhen zwischen den DEAs je nach Tageszeit unterschiedliche schwanken.

In Fall Nr.1 liegen die Vordruckhöhen der DEA HEIN HZ1 während des Tages (30.09. und 01.12.) um 0,8 bzw. 0,9 m unter denen der DEA OETI. Während der Nachtzeit (20.03. und 08.04.) liegen die Vordruckhöhen der DEA HEIN HZ1 zwischen 0,8 und 1,1 m über denen der DEA OETI. Das ergibt eine zur Tageszeit um 1,6 bis 2,0 m geringere Vordruckhöhe der DEA HEIN zur DEA OETI im Vergleich zur Nachtzeit. Werden die Vordruckhöhendifferenzen zwischen DEA HEIN HZ1 und DEA MATH verglichen, ist in Fall Nr.1 ebenfalls ein Absinken der Differenz zur Mittagszeit zu erkennen. Anstatt 4,8 bzw. 5,1 m während der Nachtzeit (20.03. und 08.04.) liegen die Vordruckhöhen der DEA HEIN HZ1 während des Tages (30.09. und 01.12.) nur noch um 2,7 m über denen der DEA MATH. Dies deutet darauf hin, dass sich die Vordruckhöhen der DEAs je nach Tageszeit unterschiedlich ausbilden. Der Vordruck der DEA HEIN sinkt zur Mittagszeit stärker, als die Vordruckhöhen der DEA MATH und OETI. Dies soll im folgenden Beispiel weiter verdeutlicht werden.

Die Messreihen des Falls Nr. 4 und 5 unterscheiden sich neben dem Förderzustand der DEA MATH und OETI auch in der Tageszeit, zu der die Messreihen gebildet wurden. Die DEA HEIN fördert in beiden Fällen ca. 400 m³/h in die HZ1. Es ist anzunehmen, dass dadurch jeweils etwa die gleichen Druckverluste im Vordruck der DEA HEIN entstehen und die Vordruckhöhen durch den Betrieb der DEA HEIN für beide Fälle in gleicher Weise beeinflusst werden. Unterschiede sollten deshalb nur auf den unterschiedlichen Förderzustand der DEA MATH und OETI sowie der unterschiedlichen Tageszeit beruhen. In Fall Nr. 4 fördert die DEA OETI in die MZ_{ALT}, in Fall Nr. 5 dagegen nicht. Die Messreihen des Falls Nr. 4 wurden jeweils um 13 Uhr zur Mittagszeit gebildet, die des Falls Nr. 5 um 22 und 23 Uhr zur in den Abendstunden. Durch den Betrieb der DEA OETI zur Zeit der Messwertaufzeichnung der Messreihen des Falls Nr. 4 sollten Verluste im Vordruck der DEA OETI entstehen und die Vordruckhöhendifferenzen zur DEA HEIN größer sein als in Fall Nr. 5, bei dem die DEA OETI während der Messwertaufzeichnungen nicht in Betrieb war. Die Vordruckhöhendifferenzen zwischen DEA HEIN und DEA OETI liegen allerdings bei Fall Nr. 5 mit 0,6 bis 1,8 m höher als bei Fall Nr. 4. Der zur

Mittagszeit entstehende Druckabfall vor der DEA HEIN überwiegt demnach den durch den Betrieb der DEA OETI erzeugten Druckabfall vor der DEA OETI. Dies bestärkt die bereits erläuterte Vermutung, dass die Vordruckhöhen der DEA HEIN zur Mittagszeit stärker fallen als die Vordruckhöhen der DEA OETI.

Bei den Messreihen innerhalb des Falls 2 ist dieser Effekt nicht so deutlich zu erkennen. Die Vordruckhöhen der DEA HEIN sinken um 15 Uhr (14.04.) zwischen 0,3 und 1,4 m mehr als die der DEA MATH. Im Vergleich zur DEA OETI sinken die Vordruckhöhen der DEA HEIN um 0,5 bis 0,9 m. Dies zeigt auch, dass die unterschiedliche Vordruckhöhenveränderung von Tag- zu Nachtbetrieb zwischen DEA HEIN auf der einen und den DEAs MATH und OETI auf der anderen Seite nicht genau zu quantifizieren ist. Die Schwankungen reichen mit 0,3 m vom Bereich der Fehlertoleranz der Druckmesser bis zu 2,4 m.

Tabelle 21: Ausgewählte Stundenwerte zur Analyse der Vordrucksituation

Fall	Datum	Tageszeit	HB OBER			HEIN MZ			HEIN HZI			MATH			OETI					
			Höhe [m] = 182	rechts [m]	qualitativ	Q [m³/h]	Höhe [m] = 165,38	pvor [bar]	Q [m³/h]	Höhe [m] = 165,38	pvor [bar]	H (berein.)	Höhe [m] = 173	pvor [bar]	H (berein.)	Differenz MATH H zu HEIN HZI	Höhe [m] = 145,58	pvor [bar]	H (berein.)	Differenz OETI H zu HEIN HZI
1	20.03.2014	1 Uhr	3,5	3,3	steigt	1100	0	2,28	0	2,29	187,9	0	1,04	182,8	5,1	0	4,12	186,8	1,1	
	2 Uhr	3,72	3,52	0		2,31	187,7	0	1,08	182,8	4,9	0	4,15	186,7	1,0					
	30.09.2014	13 Uhr	3,9	3,7		steigt	900	0	1,86	0	1,87	184,5	0	0,86	181,9	2,7	0	3,9	185,4	-0,9
2	08.04.2014	4 Uhr	5,28	5,02	5	konstant	-125	0	2,37	0	2,38	185,3	0	1,16	180,5	4,8	0	4,24	184,5	0,8
	01.12.2014	15 Uhr	1,33	1,17				0	1,7	0	1,72	186,4	0	0,71	183,7	2,7	0	3,74	187,2	-0,8
	26.04.2014	23 Uhr	1,33	1,17	konstant	0	0	1,82	408	1,75	184,4	0	1,08	185,1	-0,8	26,8	3,93	186,8	-2,4	
	02.06.2014	23 Uhr	2,68	2,5	steigt	775	0	1,93	422	1,86	184,5	14,9	1,08	184,2	0,3	0	4	186,6	-2,0	
	14.04.2014	15 Uhr	3,19	2,98	steigt	900	0	1,74	433	1,66	184,1	8	1,02	185,2	-1,1	0	3,89	187,0	-2,9	
3	13.07.2014	19 Uhr	2,17	2,01	konstant	-50	0	2,01	0	2,01	186,0	0	0,87	182,0	4,0	67,5	3,96	186,1	-0,1	
	11.07.2014	19 Uhr	3,03	2,83	steigt	400	0	2,07	0	2,07	186,6	0	0,86	181,9	4,7	71,4	3,97	186,2	0,4	
4	11.06.2014	13 Uhr	3,14	2,95	steigt	450	0	1,74	448	1,79	183,3	15,3	1,06	183,5	-0,2	77,6	3,93	185,3	-2,0	
	13.06.2014	13 Uhr	3,26	3,06	konstant	-75	0	1,76	410	1,81	183,7	15,2	1,05	183,6	0,1	80,9	3,93	185,5	1,8	
5	01.08.2014	23 Uhr	3,16	2,96	konstant	0	0	2,07	401	2,11	187,1	65,2	0,91	182,5	4,6	0	4,07	187,3	-0,2	
	28.07.2014	22 Uhr	2,98	2,8	steigt	850	0	1,88	406	1,92	185,0	66	0,94	182,6	2,4	0	3,98	186,2	-1,2	

9. Analyse der Vordrucksituation in Bezug auf die niederzonenseitigen Druckverluste

Um die durch den Betrieb der DEA niederzonenseitig entstehenden Druckverluste in STANET zu berücksichtigen, werden aus den Messreihen von Tabelle 21 Vordruckhöhen der DEA HEIN HZ1 zu unterschiedlichen Förderzuständen verglichen.

Dazu werden Vordruckhöhen, deren Ausbildung durch die Förderung von ca. 400 m³/h durch die DEA HEIN HZ1 beeinflusst wurden, mit solchen verglichen, die während eines Zeitraumes ermittelt wurden, in dem die Pumpen der DEA HEIN HZ1 ausgeschaltet waren. Um die durch den Behälterwasserstand entstehenden Unterschiede in den Vordruckhöhen auszugleichen, werden die bereinigten Vordruckhöhen verglichen. Damit der Einfluss der Netzbedingungen der NZ auf die Ausbildung unterschiedlicher Vordruckhöhen bei beiden betrachteten Varianten möglichst gleich ist, müssen die Messreihen zu ähnlichen Tageszeiten erhoben worden sein. In Anlehnung an die Netzkalibrierung wird angenommen, dass sich dafür die Nachtzeit am besten eignet. Laut Hähnlein und Strutz würde dadurch der unbekannte räumliche und zeitliche Einfluss von Verbrauchern auf ein Minimum reduziert (Hähnlein und Strutz 2010, S. 11).

Die gestellten Anforderungen treffen für die Variante, in der die Pumpe ausgeschaltet sind, am besten auf die Messreihen vom 20.03., 30.09 sowie 08.04. des Falls Nr.1 zu. Die bereinigten Vordruckhöhen der DEA HEIN HZ1 betragen bei diesen drei Messreihen im Durchschnitt ca. 187 m. Auf der anderen Seite stehen die Messreihen vom 26.04. sowie 02.06. des Falls Nr.2. Diese Erfüllen die oben gestellten Anforderungen an die Vergleichbarkeit sowie die Bedingung, dass die Pumpen der DEA HEIN HZ1 einen Volumenstrom von 400 m³/h fördern. Die bereinigten Vordruckhöhen betragen bei diesen beiden Messreihen im Durchschnitt ca. 184,5 m. Es ergibt sich eine Differenz in der Vordruckhöhe von 2,5 m.

Im weiteren Verlauf wird davon ausgegangen, dass durch den Betrieb einer DEA bei einem Förderstrom von 400 m³/h ein Druckverlust im Vordruck von 2,5 m entsteht.

10. Druckunterschiede durch falsche geodätische Höhen oder falsch eingestellte Offsetspannung

Die Druckunterschiede zwischen den DEAs im Nachtbetrieb bei ausgeschalteten Pumpen deuten auf fehlerhafte Daten hin. Es ist denkbar, dass die angegebenen geodätischen Höhen der Druckmesser fehlerhaft sind oder die Offsetspannung der Druckmesser fehlerhaft angelegt ist. Für beide Fehlerquellen gilt, dass die Druckhöhen der Druckmesser selbst und somit die ermittelten Differenzen zwischen den Druckmessern der DEAs fehlerhaft sind. Die Differenz zwischen zwei Drücken, die von einem einzelnen Druckmesser über die Zeit hin gemessen werden, ist bei einer falsch angegebenen geodätischen Höhe dennoch korrekt. Im Folgenden wird erläutert warum dies auch für eine falsch angelegte Offsetspannung gilt.

Die Offsetspannung wird an einen Druckmesser angelegt, um die vom Druckmesser angezeigten Drücke auf die realen Drücke einzustellen. Hintergrund ist die hinter dem Druckmesser stehende Elektrotechnik. In Abbildung 36 wird das Prinzip der Offsetspannung grafisch dargestellt. U_e ist die Eingangsspannung, U_a ist die Ausgangsspannung des Operationsverstärkers im Druckmesser. „Beim realen Operationsverstärker ist die Ausgangsspannung bei der Eingangsspannung $U_e = 0V$ ungleich Null. Um diesen Versatz in der Kennlinie auszugleichen, muss eine kleine Spannungsdifferenz am Eingang angelegt werden. Diese Spannungsdifferenz wird *Offsetspannung* U_{os} (engl. input offset voltage) genannt.“ (Palotas 2003, S. 132).

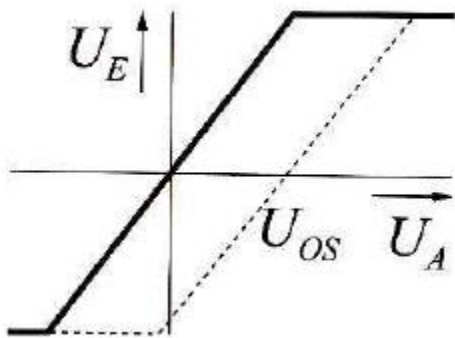


Abbildung 36: Offset (Palotas 2003, S. 132)

Entscheidend für diese Arbeit ist, dass bei einer unzulänglich angelegten Offsetspannung eine Verschiebung der gemessenen Druckhöhen gegen die realen Druckhöhen vorliegt. Nach dem oben beschriebenen Prinzip der Offsetspannung ist davon auszugehen, dass diese Verschiebung konstant bleibt, sodass die zwischen den Drücken eines Druckmessers ermittelten Druckschwankungen durch die mangelhaft eingestellte Offsetspannung nicht betroffen sein sollten.

11. Sonstige Anpassungen am Rechnernetzmodell und den Simulationsvorgaben

Im Folgenden werden die Anpassungen am Rechnernetzmodell und den Simulationsvorgaben aufgeführt.

Anpassungen am Rechnernetzmodell:

- Die Rohrdurchmesser der in der DEA OETI verwendeten Leitungen werden auf Leitungen der DEA HEIN übertragen, da die beiden neuen DEAs baugleich sein werden.
- Die bis dahin noch nicht verlegten Leitungen der neuen Westspange in der Teichhausstraße, Roßdörfer Str., Wienerstraße und Heinrichstraße werden ins Rechnernetzmodell integriert (DN 400, Rauigkeit 2 mm).
- Das Netz des ALT-Zustandes wird durch das bis dahin nicht berücksichtigte ÜSV HEIH erweitert. Dazu wird eine Rückschlagklappe in Richtung NZ gesetzt und hinter der Rückschlagklappe ein Druckknoten mit dem für das ÜSV geltenden Nenndruck von 7,2 bar angelegt. Das gesetzte ÜSV kann für Simulationen im SOLL-Zustand durch einen eigenen Layer deaktiviert werden.
- Für Simulationen im ALT-Zustand wird die DMA BRES der HZ3b hinzugefügt und alle Schieber zur MZ geschlossen. Die Schieber werden mit Ereignissen belegt, um sie für Simulationen im SOLL-Zustand zu öffnen.
- Eine zweite Pumpe wird für die DEA MATH gesetzt, um Förderströme von 180 m³/h im SOLL-Zustand simulieren zu können.

Anpassungen der Simulationsvorgaben

- Es werden 10 unterschiedliche Verbrauchsprofile angelegt, um die fünf Lastfälle des Lastprofils jeweils im ALT-Zustand als auch im SOLL-Zustand simulieren zu können.
- Es wird ein eigenes Verbrauchsprofil für die HZ2b hinzugefügt, um bilanzierten Fördermengen der HZ2b aus den Simulationen der MZ_{SOLL} ausschließen zu können.
- Der Jahresverbrauch der Verbraucher des Studentenwohnheims Karlshof wird von 124.000 m³/a auf 62.000 m³/a angepasst (Information Herr Maurer).
- Der Verbrauch des Studentenwohnheims Karlshof wird für Simulationen im ALT-Zustand auf null gesetzt (mit Ereignis), da dieses im ALT-Zustand an die NZ angeschlossen ist.
- Nach Durchsicht der Durchflussmengen vom HB DACH in Richtung ORA/NRA/TRA werden die Jahresverbräuche der Abnehmer „Ober-Ramstadt“ und „Mühltal“ jeweils von 359.000 m³/a auf 125.000 m³/a herabgesetzt.
- Die Pumpenkennlinien der alten DEAs werden an Messwerte und Informationen von Herrn Maurer angepasst.
- Die Pumpenkennlinien der neuen DEAs werden an die in den Leistungsprüfungen des Pumpenherstellers vorgegebenen Pumpenkennlinien angepasst.

- Die Fördermengen und Ausgangsdrücke nach den Pumpen der alten DEAs werden an den von Herrn Maurer gegebenen Informationen (Fördermengen) und an von der *Hessenwasser* gelieferten Messwerten (Ausgangsdruck) angepasst. In Tabelle 22 werden die Fördermengen und Ausgangsdrücke der alten DEAs aufgelistet.
- Die für die DMAs geltenden Einstell-Solldrücke werden auf die Informationen aus dem Jahreswasserbericht 2013 (siehe ENTEGA 2014, S. 22) angepasst und in Tabelle 23 wiedergegeben.

Tabelle 22: Fördermengen und Ausgangsdrücke der alten DEAs

DEA	Fördermenge [m³/h]	Ausgangsdruck [bar]
MATH	90	k.A.
MARI	2 · 120	7,5
HEIN HZ 1	2 · 400	10
HEIN MZ	2 · 200	5,4
OBER	2 · 52	k.A.

Tabelle 23: Einstell-Solldrücke der DMAs nach Jahreswasserbericht 2013 (siehe ENTEGA 2014, S. 22)

DMA	Einstell-Solldruck [bar]
HEIN HZ2a	5,4
HEIN HZ3a	4,5
BRES	4,9
KLAP	5
HDEL	6,5.
JAHN	4,2

12. Tabellen zur Ermittlung des Energiebedarfs des ALT-Zustandes

Tabelle 24: Fördermengen, Energiebedarf und spezifischer Energiebedarf der DEAs 2013

DEA	V 2013 [m³]	E _{el} 2013 [kWh]	e [kWh/m³]
MATH	277.206	72.451	0,26
MARI	1.123.485	341.023	0,30
HEIN HZ1	710.327	258.374	0,36
HEIN MZ	491.869	91.850	0,19
OBER	120.053	22.726	0,19
Gesamt	2.722.940	786.425	0,29

Tabelle 25: Fördermengen der DMAs 2013

DMA	V 2013 [m³]
KLAP	421.878
JAHN	178.863
HEIN HZ2a	129.320
HEIN HZ3a	188.616
BRES	k.A.
ÜSV HEIH	23.956

Tabelle 26: Fördermengen, Energiebedarf und spezifischer Energiebedarf der HZs 2013

Hochzonen	V 2013 [m³]	E _{el} 2013 [kWh]	e [kWh/m³]
HZ2a	730.061	238.638	0,33
HZ3a	585.875	137.449	0,23
HZ3b	36.921	12.069	0,33
MZ _{ALT}	491.869	91.850	0,19
Gesamt	1.820.769	480.006	0,26

13. Tabellen zur Ermittlung des Energiebedarfs des SOLL-Zustandes

Tabelle 27: Jahresenergiebedarf zur Versorgung der MZ_{SOLL}; Pumpensteuerung OETI

						Geodät. Höhe [m] 181,5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
--	--	--	--	--	--	------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Tabelle 28: Jahresenergiebedarf zur Versorgung der MZ_{SOLL}; Pumpensteuerung HEIN

					Geodät. Höhe [m]																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
--	--	--	--	--	---------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

[illegible]

[illegible]

14. Netzgrafiken

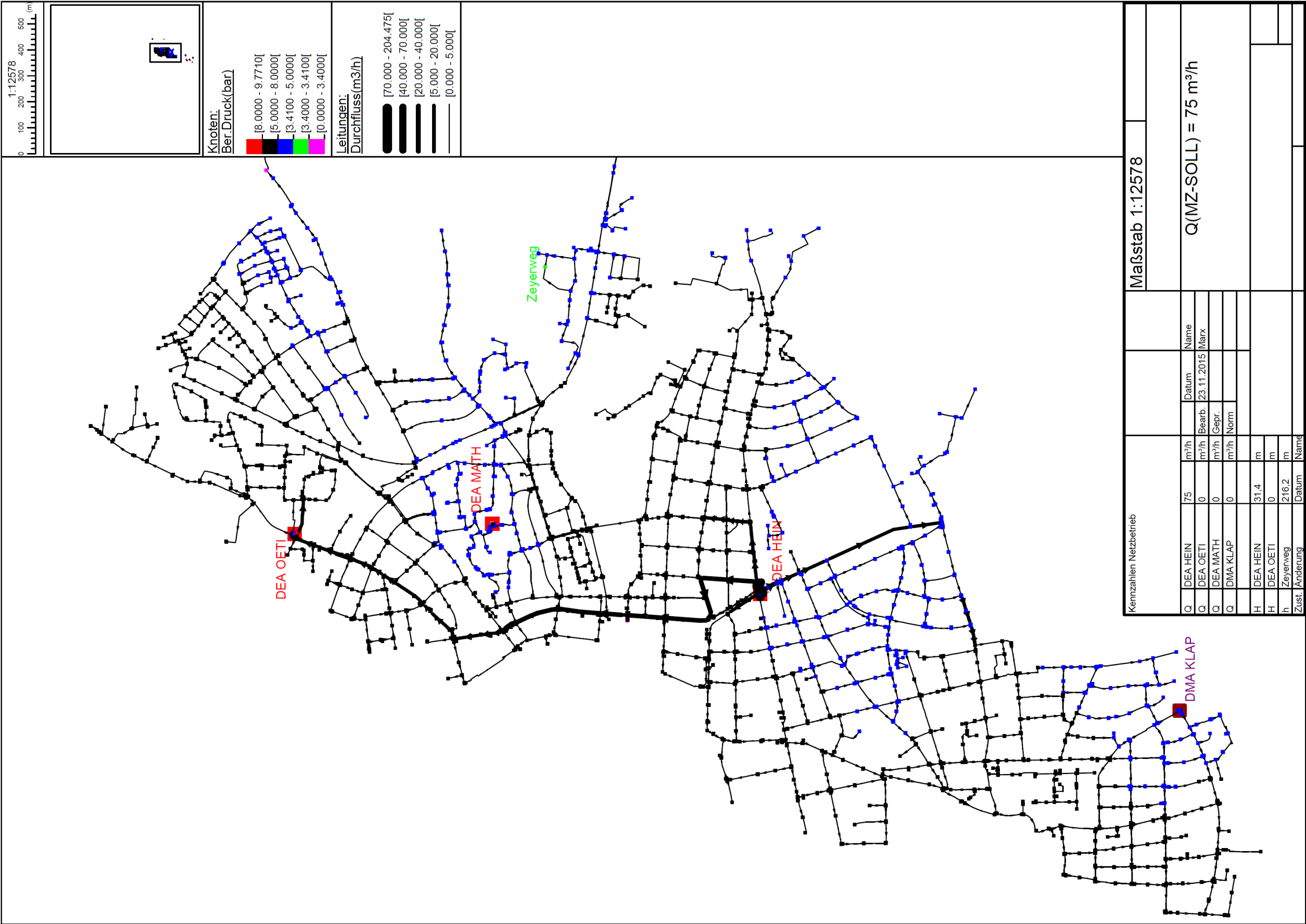


Abbildung 37: Strömungsverhältnisse in der MZsoll beim Lastfall Q=75 m³/h; Versorgung über DEAs HEIN und OETI; Mindestnetzdruck = 3,4bar

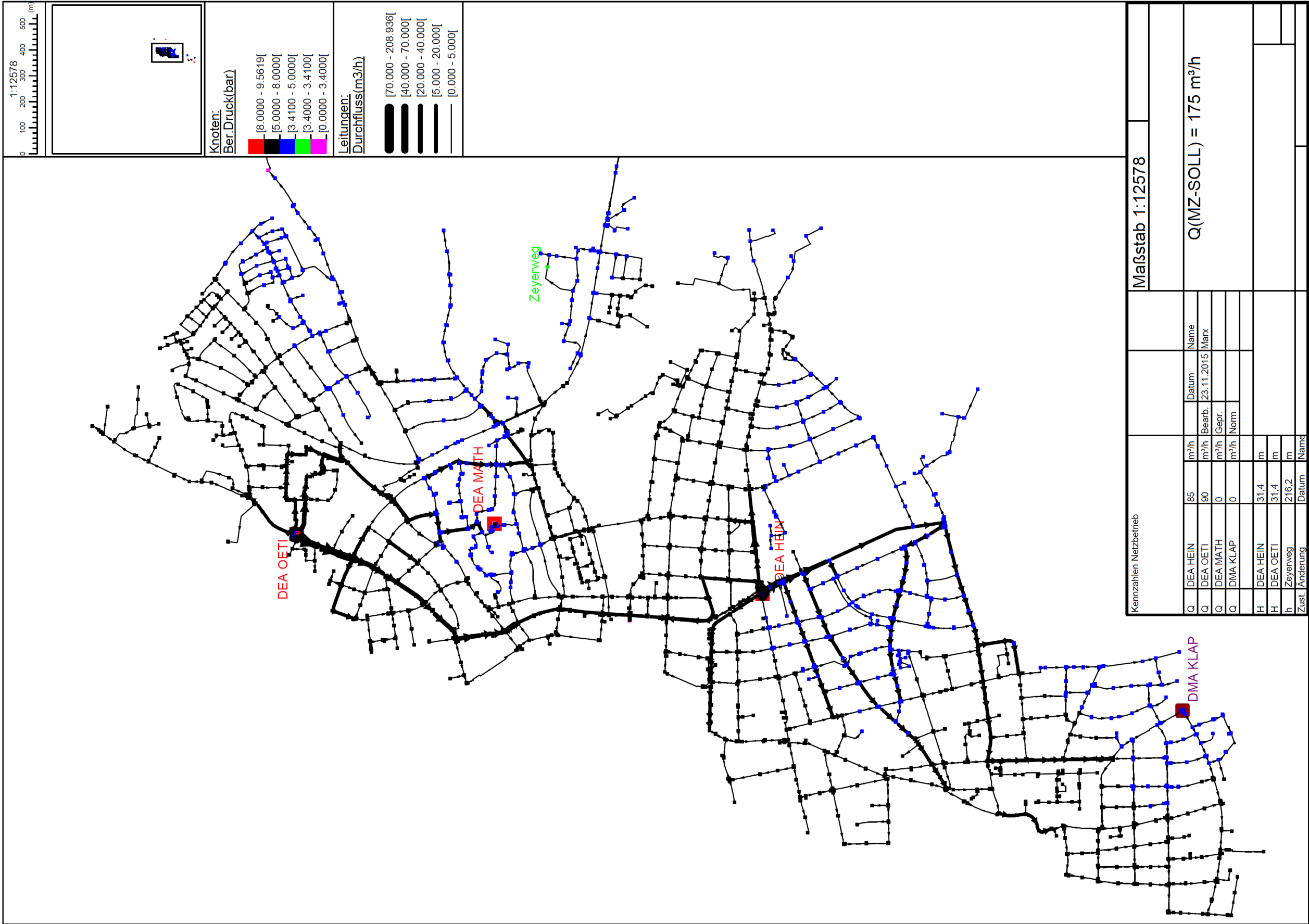


Abbildung 38: Strömungsverhältnisse in der MZsoll beim Lastfall $Q=175\text{ m}^3/\text{h}$; Versorgung über DEAs HEIN und OETI; Mindestnetzdruck = 3,4bar

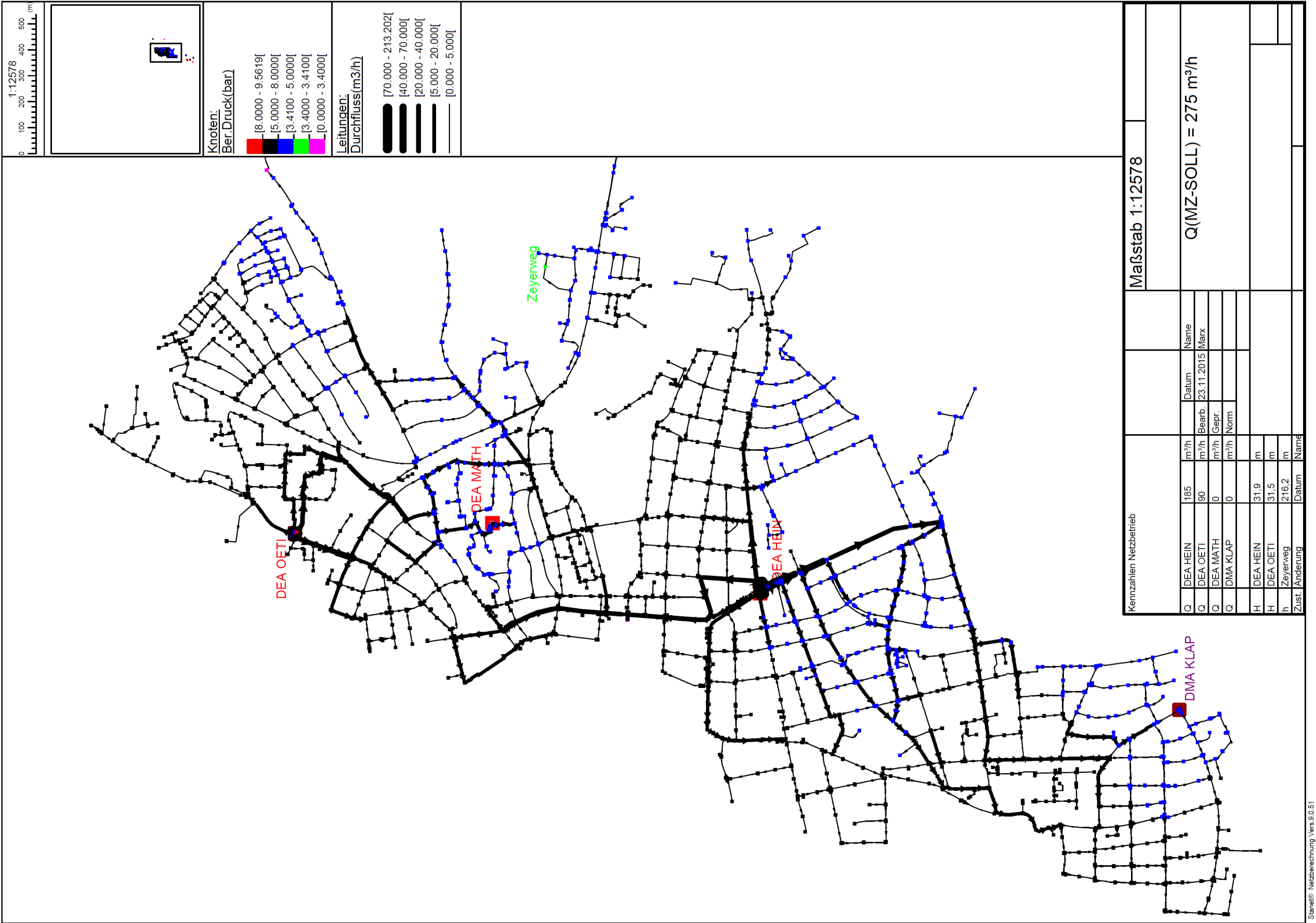
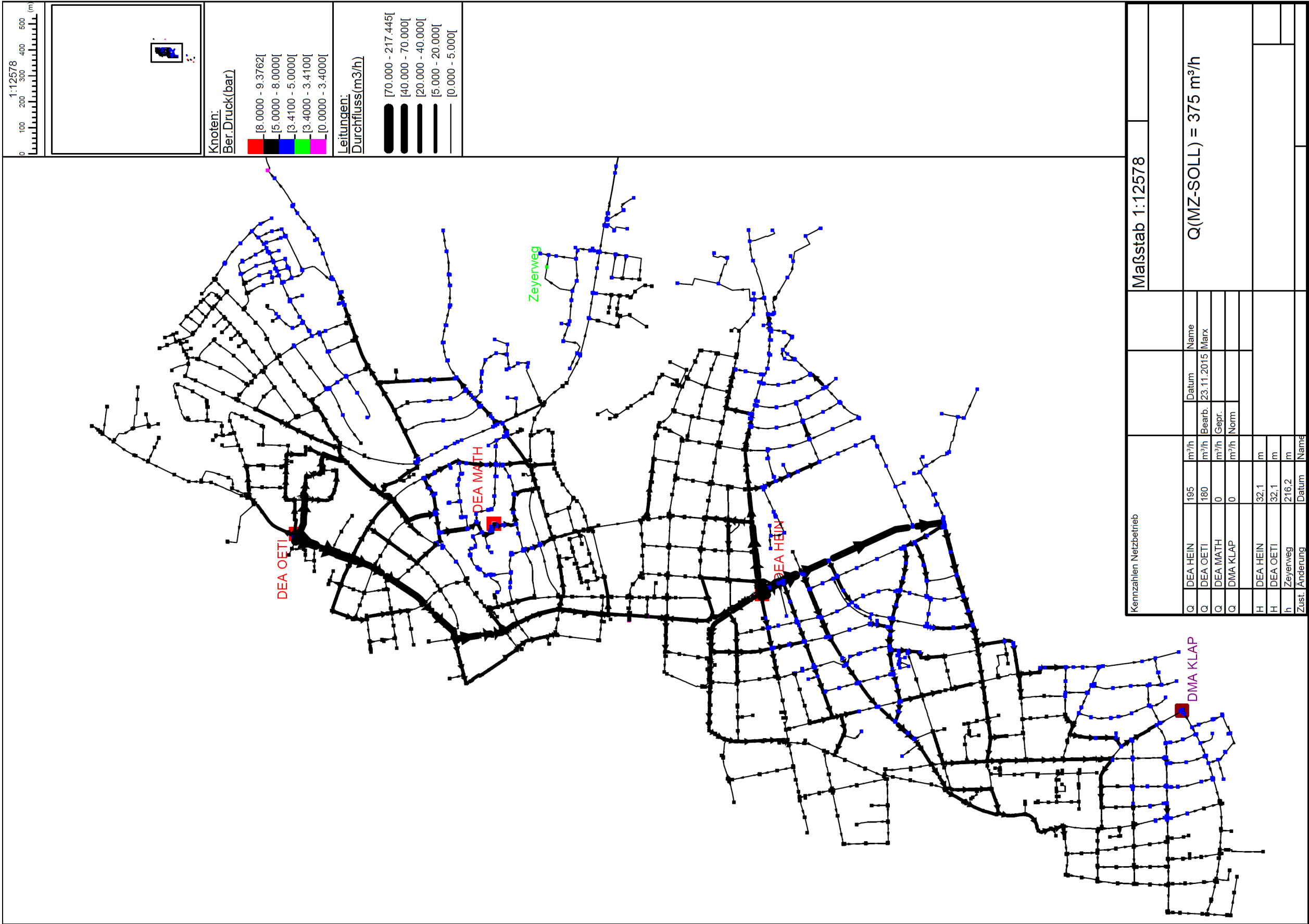


Abbildung 39: Strömungsverhältnisse in der MZsoll beim Lastfall $Q=275\text{ m}^3/\text{h}$; Versorgung über DEAs HEIN und OETI; Mindestnetzdruck = 3,4bar



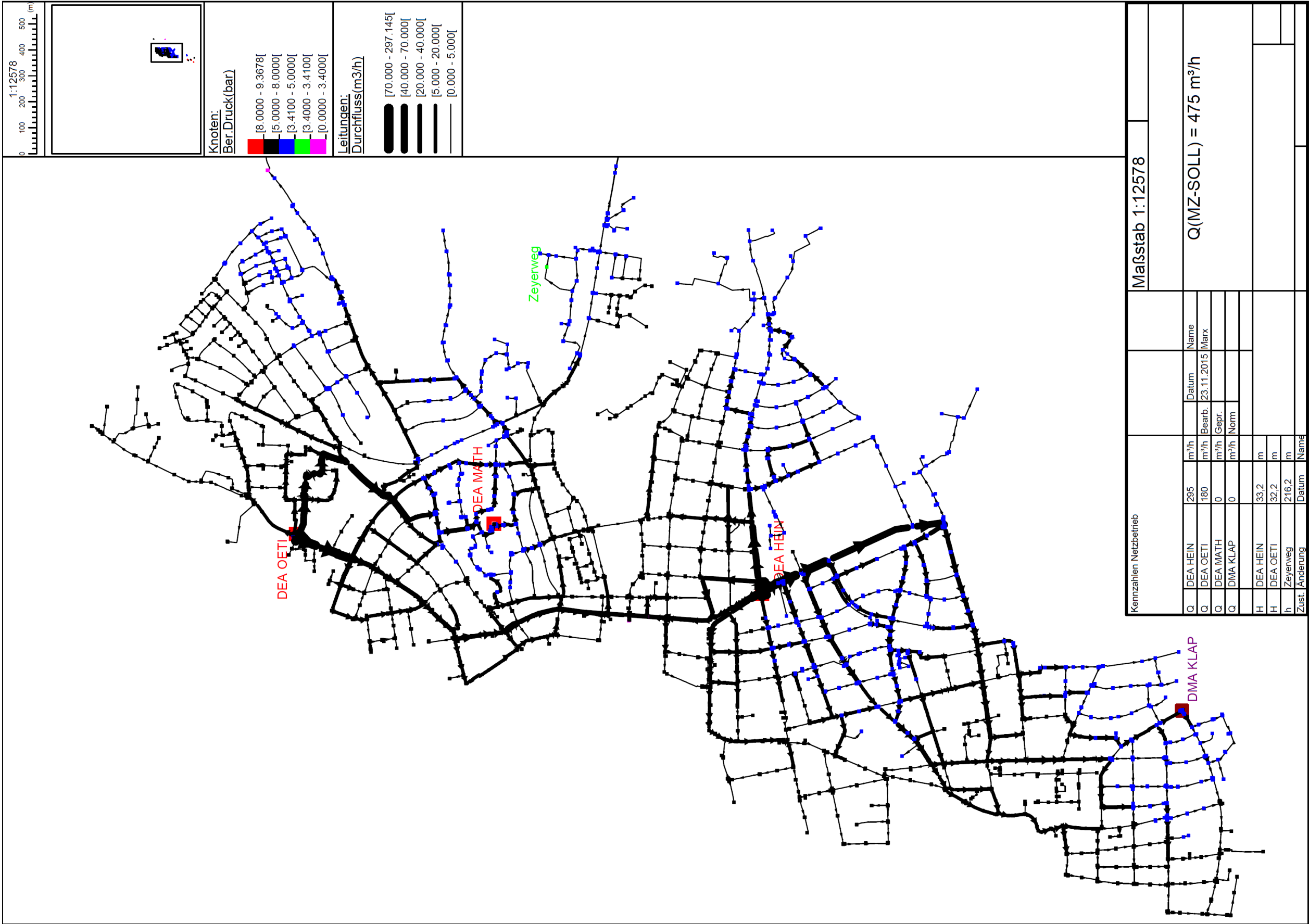


Abbildung 41: Strömungsverhältnisse in der MZsoll beim Lastfall $Q=475\text{ m}^3/\text{h}$; Versorgung über DEAs HEIN und OETI; Mindestnetzdruck = 3,4bar

